www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

JAARGANG 22, 1960, no. 3 blz. 69-112 Verschenen 19 juli 1960

Philips Technisch Tijdschrift

BEHANDELEND TECHNISCHE VRAAGSTUKKEN
SAMENHANGENDE MET DE PRODUKTEN, WERKWIJZEN EN ONDERZOEKINGEN
VAN DE N.V. PHILIPS' GLOEILAMPENFABRIEKEN

RADIOGOLVEN VERKENNEN ONZE ATMOSFEER

door H. BREMMER.

538.56:621.396:525.7

In zijn rede, uitgesproken bij de aanvaarding van het ambt van buitengewoon hoogleraar aan de Technische Hogeschool te Eindhoven op 12 februari 1960, geeft prof. dr. Bremmer een overzicht van de wijzen waarop uit het gedrag van radiogolven onze kennis van de atmosfeer is verrijkt. De laatste jaren zijn op dit gebied belangrijke nieuwe ontdekkingen gedaan, zowel doordat de ontwikkeling van de ruimtevaart het mogelijk heeft gemaakt, radiozenders tot buiten de ionosfeer te brengen, als door het toepassen van zeer gevoelige radarmethodes bij waarnemingen vanaf de aarde.

*Met vriendelijke toestemming en medewerking van prof. Bremmer geven wij in onderstaand artikel de hoofdzakelijke inhoud van zijn rede *), aangevuld met enige figuren en een lijst van literatuuraanhalingen.*

In hetgeen volgt, zal aandacht worden gevraagd voor het feit dat de ruimtevaart ons in staat stelt onze kennis van de fysisch-chemische structuur van de dampkring aanzienlijk te vergroten, zonder daarbij te denken aan de voordelen die dit voor de verdere ontwikkeling van de ruimtevaart zelf oplevert. We weten dat de raketten worden uitgerust met meetinstrumenten. De meetresultaten worden ons in codevorm toegestuurd door een meegevoerd radiozendertje. Minder bekend is dat de door dit zendertje uitgezonden radiogolven ons tijdens hun reis tevens rechtstreeks informatie kunnen verschaffen over de ruimte die zij onderweg passeren. Deze ruimte heeft namelijk een, zij het geringe, invloed op het gedrag van deze golven. Een dergelijke invloed ondergaan ook de golven die worden uitgezonden door een op de aarde geplaatste zender; deze zullen immers eveneens een kortere of langere baan door de dampkring moeten afleggen alvorens een ontvanger te bereiken. In dit laatste geval kunnen we evenwel slechts met grote moeite informatie verkrijgen over de atmosferische structuur boven een hoogte van ongeveer 400 kilometer. Indien men afziet van zeer speciale installaties, is dit namelijk de grootste hoogte tot waarop de golven van een aardse zender doordringen, voor zover zij tenminste na het bereiken van een hoogste punt naar de aarde terugkeren en dan door ons kunnen worden opgevangen. De raketten verschaffen ons echter de mogelijkheid om het radio-onderzoek van de dampkring tot boven de grens van 400 kilometer voort te zetten. Dergelijke onderzoekingen hebben reeds op beperkte schaal plaatsgehad in het kader van het onlangs afgesloten internationale geofysische jaar.

Hieronder volgt een algemeen overzicht van de achtergrond van onderzoekingen waarbij de structuur van onze dampkring met behulp van radiogolven onderzocht is. Daarbij zullen naast elkaar ter sprake komen: resultaten die verkregen zijn met raketten, en andere, verkregen met metingen vanaf het aardoppervlak.

De ionosfeer als hypothese ter verklaring van de dracht van radiogolven

Radiogolven zijn in fysisch opzicht verwant met de door ons oogzintuig direct waarneembare lichtgolven. Voor beide geldt dat zij zich slechts dan met een constante snelheid en langs rechtlijnige banen voortplanten indien de ruimte òf leeg is òf volmaakt homogeen van samenstelling. Onze dampkring

*) Uitgegeven door J. B. Wolters, Groningen 1960.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

vormt echter slechts bij benadering een homogene ruimte. Immers, de lokale weersomstandigheden verraden ons reeds dat zijn detailstructuur van plaats tot plaats verschillend moet zijn. Daarom zijn voor radiogolven merkbare afwijkingen van rechte banen te verwachten. Dat deze afwijkingen zelfs aanzienlijk kunnen zijn, was een conclusie waartoe men kwam toen bleek dat met bepaalde zenders radiocommunicatie tot over de gehele wereld mogelijk is. Bij een nagenoeg rechtlijnige voortplanting van radiogolven zou de actieradius van een zender niet veel verder kunnen reiken dan de horizon zoals deze vanuit de zendermast waargenomen wordt. Verderop gelegen ontvangers liggen onder deze horizon en kunnen niet langs rechte verbindingslijnen vanuit de zender bereikt worden. Toch zou men nog wel redelijke ontvangst tot op enige afstand voorbij deze horizon mogen verwachten, tot in het begin van het schaduwgebied; radiogolven kunnen namelijk nog enigszins in dergelijke gebieden doordringen, zelfs beter dan lichtgolven. Deze doordringdiepte tot voorbij de zenderhorizon kan wiskundig berekend worden. Onderzoekingen van de Engelsman Watson [1]) *) — op het belang waarvan Van der Pol hem heeft gewezen — hebben echter in 1918 onomstotelijk aangetoond dat op deze wijze nooit verklaard kan worden dat zenders in het veel gebruikte golflengtegebied tussen 100 m en 10 m over de gehele aarde beluisterd kunnen worden. Reeds in 1902 hebben Heaviside in Engeland en Kennelly in Amerika intuïtief aangevoeld dat de verklaring van deze grote dracht moet worden gezocht in de niet-homogene structuur van de dampkring. Zij opperden als hypothese het bestaan van een geleidende laag op grote hoogte. De bovengenoemde radiogolven zouden dan ieder punt op aarde kunnen bereiken langs zigzagbanen, waarbij zij onderweg afwisselend teruggekaatst worden tegen deze geleidende laag en tegen het aardoppervlak. Heaviside stelde zich bovendien voor dat de bewuste laag geladen deeltjes zou bevatten, die gevormd worden door de ioniserende werking van de zon; deze onderstelling is volkomen juist gebleken. Overigens was de mogelijkheid van een dergelijke geleidende laag ook reeds in 1878 door Balfour Stewart overwogen om er de dagelijkse variaties van het aardmagnetisme mee te verklaren. Deze, de radiogolven reflecterende, laag wordt thans in navolging van Watson Watt algemeen met de naam ionosfeer aangeduid, ter vervanging van de vroegere naam Kennelly-Heaviside-laag.

*) De literatuuraanhalingen zijn verenigd in een lijst aan het slot van dit artikel.

Peiling van de ionosfeer

Zolang de ionosfeer slechts ondersteld werd om uiteenlopende verschijnselen begrijpelijk te maken, tastte men volkomen in het duister omtrent haar hoogte boven het aardoppervlak en haar verdere eigenschappen. Pas in 1925 hebben Appleton en Barnett haar hoogte geschat door een interpretatie van het als sluiering (fading) bekend staande verschijnsel van het op-en-neergaan van de sterkte van een radiosignaal [2]). Zij toonden aan dat des nachts aan middengolven waargenomen sluieringsverschijnselen begrepen kunnen worden wanneer men aanneemt dat de ontvanger tegelijkertijd bereikt wordt door een dicht langs het aardoppervlak voortgaande „grondgolf", en door een onderweg door de ionosfeer teruggekaatste „ruimtegolf". De daarbij waargenomen sluiering kon uit de interferentie van deze beide golven verklaard worden indien de ionosfeer op een hoogte van ongeveer 85 km gelegen zou zijn. Nog in hetzelfde jaar werd deze hoogte voor het eerst meer rechtstreeks, en nauwkeuriger, bepaald door Breit en Tuve [3]). Zij werd door hen berekend uit het waargenomen verschil in aankomsttijd van de grondgolf en de ruimtegolf. Feitelijk is dit het oudst bekende voorbeeld van een radarexperiment. Men heeft hier immers te maken met een radiogolven reflecterend object (de ionosfeer) waarvan men niet alleen de aanwezigheid constateert, maar tevens de afstand bepaalt. In hun publikatie over dit onderzoek merkten Breit en Tuve destijds op: „We are hoping that such experiments will be performed by others as well as ourselves". Wel zelden zal een dergelijke op schrift uitgesproken wens zozeer in vervulling zijn gegaan als hier. Meer dan honderd waarnemingsstations voeren thans dagelijks vele malen metingen uit volgens het door Breit en Tuve aangegeven beginsel. In de eenvoudigste vorm bepaalt men daarbij de tijd die een verticaal omhooggezonden radiosignaal nodig heeft om de ionosfeer te bereiken, en daarna naar de aarde terug te keren. Men kan hier spreken van een echotijd. De systematische ionosferische echotijdmetingen zijn een routinewerk geworden, vergelijkbaar met dat van de geregelde meteorologische waarnemingen.

Het hier genoemde echo-effect hangt af van de gebezigde golflengte of frequentie. Naarmate de frequentie hoger is, dringt de golf namelijk dieper in de ionosfeer door en wordt de echotijd dus langer. Uit de metingen bleek dat de ionosfeer in grote trekken uit drie opeenvolgende lagen bestaat, die zich uitstrekken tussen ongeveer 70 km en 400 km boven het aardoppervlak. Door de echotijd voor vele frequenties te bepalen en de uitkomsten op de juiste wijze te interpreteren, kon de voordien totaal ver-

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

borgen gebleven detailstructuur van de ionosfeer geheel en al blootgelegd worden. De voor deze interpretatie nodige theorie was eigenlijk reeds in 1912 in Engeland door Eccles ontwikkeld [4]); zij betrof de voortplanting van elektromagnetische golven door een gas met geladen deeltjes, dus een medium dat overeenkomt met de ionosfeer. Men had leren inzien dat bij een gelijktijdige aanwezigheid van verschillende soorten geladen deeltjes, en wel van ionen en elektronen, slechts de laatste van belang zijn voor de wijze waarop een radiogolf voortgeleid wordt. De theorie leerde in het bijzonder dat de voortplantingssnelheid van een de ionosfeer binnendringende radiogolf, de zg. fazesnelheid, moet toenemen wanneer de golf bij het omhooggaan steeds grotere elektronenconcentraties aantreft. De oorspronkelijk rechte baan ondergaat daardoor een neerwaartse afwijking en zal onder daarvoor gunstige omstandigheden zelfs geheel naar de aarde teruggebogen worden. Dergelijke gekromde banen, die in een atmosferische laag na het bereiken van een hoogste punt weer benedenwaarts terugbuigen, waren reeds bekend voor de akoestische golven die bij explosies en artilleriegevechten opgewekt worden. Het hoogste baanpunt ligt daar echter veel lager, namelijk in de op ongeveer 30 km hoogte gelegen laag van onze dampkring die gekenmerkt wordt door een groot gehalte aan ozon.

Maar keren we terug tot de ionosfeer. Het is uitsluitend de eigenschap dat de voortplantingssnelheid van de omhooggaande radiogolven toeneemt, die het radioverkeer over zeer grote afstanden mogelijk maakt. Theoretisch had men dus beredeneerd dat de voortplantingssnelheid van een radiogolf moet toenemen wanneer deze een medium met geladen deeltjes binnendringt. Het was wenselijk dit door een laboratoriumproef te bevestigen. Dit is het eerst gelukt aan Van der Pol, volgens methodes die hij uitvoerig heeft beschreven in zijn proefschrift van 1920 [5]). Aldus was het algemene inzicht omtrent het mechanisme van de radiotransmissie via de ionosfeer vijf jaren vooruit op de eerste directe waarnemingen van de afzonderlijke ionosferische lagen in 1925.

Een verdere vooruitgang werd in 1930 geboekt toen W. de Groot een wiskundige methode aangaf om uit de waargenomen wijze waarop de ionosferische echotijden afhangen van de frequentie, rechtstreeks de elektronenconcentraties in de lagen te berekenen [6]). Hiermee vond men dat in de meest bekende lagen (van beneden naar boven D-, E- en F-laag genoemd) het aantal elektronen per cm^3 een getal is in de orde van grootte van resp. 10^3, 10^5 en 10^6. De Groot merkte ook op dat het op deze wijze slechts mogelijk is om van iedere laag het onderste gedeelte te onderzoeken, d.w.z. het gedeelte beneden het niveau waar de elektronenconcentratie het grootst is. Hierin is pas verandering gekomen sinds men met behulp van raketten gegevens kan verkrijgen van ieder niveau dat een raket onderweg passeert [7]). Men meet daartoe de frequentieverandering, het zogenaamde dopplereffect, van het radiosignaal dat door een zendertje aan boord naar de aarde gestuurd wordt. Het dopplereffect hangt hier af van de snelheid van de raket, en van de plaatselijke snelheid van de radiogolf; deze laatste wordt op haar beurt bepaald door de elektronenconcentratie nabij de raket. Omdat de snelheid en de baan van de raket bekend zijn, kan men dan uit het verloop van deze frequentieverschuiving rechtstreeks de elektronendichtheid bepalen voor alle hoogten die de raket achtereenvolgens passeert. Deze nieuwe bepalingen bevestigen in grote trekken het beeld dat men zich voordien van de ionosferische lagen gevormd had met behulp van de echotijdmetingen. Het vertrouwen in de oude resultaten was zo groot dat eens iemand naar aanleiding van de bevestiging door de raketproefnemingen ironisch opmerkte: „Voor mij betekent dit slechts dat deze raketten inderdaad tot in de ionosfeer doorgedrongen zijn". Toch is de overeenstemming niet volmaakt; in het bijzonder bleek dat men zich vroeger de verschillende ionosferische lagen te zeer van elkaar gescheiden had voorgesteld. Zo is b.v. het minimum van de elektronendichtheid dat de E- en de F-laag van elkaar scheidt, zeer ondiep of zelfs onwaarneembaar.

De ruimte boven ongeveer 400 km.

Tot een jaar geleden was de situatie aldus dat men nog geen gedetailleerd beeld had van de aanwezigheid van elektronen boven het midden van de F-laag, dit is het gebied boven een hoogte van ongeveer 400 km. Thans kan men hierover meer zeggen door nieuwe radarexperimenten, die op een golflengte van ongeveer 7 m door Bowles aan het National Bureau of Standards opgezet zijn [8]). Hoewel een dergelijke korte golf vrijwel ongehinderd door de ionosfeer heen gaat, kan men toch, zij het met veel moeite, een uiterst zwak signaal opvangen, dat door haar onderweg vanuit de ionosfeer naar de aarde teruggestuurd wordt. Dit zwakke signaal ontstaat doordat elk der elektronen in de ionosfeer enige energie van de aankomende radiogolf opneemt en deze daarna over alle richtingen verspreidt. Een gedeelte van deze verstrooide energie keert dan naar de aarde terug. De aldus van alle elektronen gezamenlijk terugkomende energie is evenredig met de elektronenconcentratie, die op deze wijze bepaald kan worden. Men gaat nu na hoe het zwakke, van de ionosfeer terugkerende,

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

signaal met de tijd verandert, kort nadat het primaire signaal uitgezonden werd. In de eerste ogenblikken zullen slechts de in de laagste ionosfeergebieden gevormde bijdragen waargenomen kunnen worden, omdat deze het vroegst aankomen. Op latere tijdstippen zal de intensiteit bepaald worden door de elektronenconcentraties op steeds grotere hoogten.

Om bij dit experiment een meetbare intensiteit van het zwakke terugkomende signaal te verkrijgen, heeft men een zeer sterke zender en een groot antennesysteem nodig. Een bezwaar is dan ook dat deze voorwaarden zeer hoge kosten meebrengen. Men kan de kosten echter als gering beschouwen in verhouding tot wat nodig zou zijn om dezelfde gegevens te verwerven door middel van een kunstmatige aardsatelliet. De voorlopige uitkomsten tonen aan dat de elektronendichtheid boven de F-laag zeer geleidelijk afneemt, en dat er daar dus geen verdere lagen met grote elektronenconcentraties meer voorkomen. Ongetwijfeld zullen toekomstige waarnemingen met behulp van kunstmatige aardsatellieten hier nog aanvullende gegevens verschaffen.

Een ander belangrijk feit is door veel eenvoudiger waarnemingen komen vast te staan, namelijk dat tot op zeer grote hoogten overal een minimale concentratie van ongeveer 500 elektronen per cm^3 heerst, of althans dat er steeds gebiedjes met deze elektronenconcentratie aanwezig zijn. Dit volgt in het bijzonder uit waarnemingen aan het verschijnsel dat men met de technische term „whistler" aanduidt. Hieronder verstaat men door onweders opgewekte elektrische storingen die zich vanaf hun bronpunt ergens op aarde voortplanten langs een krachtlijn van het aardmagnetische veld, die tot zeer hoog in de aardatmosfeer reikt; ten slotte buigt de hoefijzervormige baan langs deze krachtlijn terug naar de aarde en bereikt haar ergens op het tegenovergestelde halfrond (*fig. 1*). Aldus konden b.v. Morgan en Allcock [9]) in 1955 een geval waarnemen waarin dergelijke storingen vele malen heen-en-weer de verre reis maakten van Wellington in Nieuw-Zeeland naar Unalaska op de Aleoeten! Onderweg werd daarbij een verste punt bereikt op een afstand van meer dan 20 000 km vanaf de aarde. Dergelijke storingen omvatten ook frequenties in het hoorbare

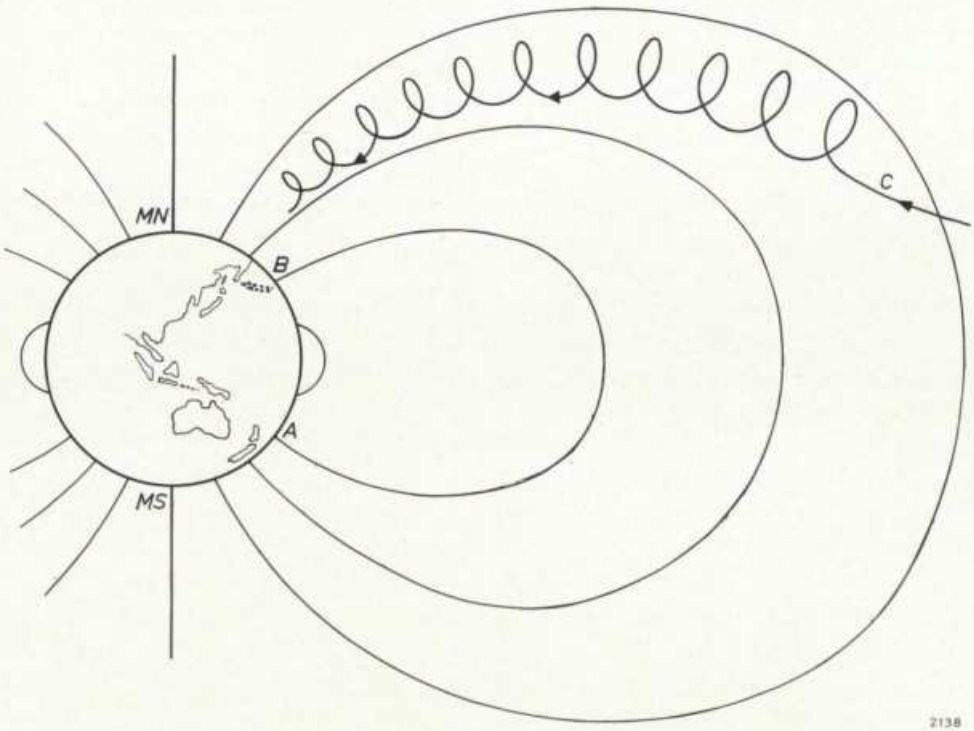


Fig. 1. Aarde met de magnetische polen *MN* en *MS* en enige magnetische krachtlijnen.
Elektrische storingen, opgewekt bij *A* (b.v. door een onweer), planten zich voort langs een krachtlijn van het aardmagnetische veld en bereiken een punt *B* op het andere halfrond. In *B* kunnen ze aanleiding geven tot een zg. whistler. De storing kan vele malen langs de krachtlijn *AB* heen-en-weer lopen.
Komt een geladen deeltje — weggeschoten door de zon — nabij *C* in het overgangsgebied (waar het aardmagnetische veld van betekenis wordt), dan gaat het een schroeflijnvormige baan om een krachtlijn heen beschrijven. In de lagere aardatmosfeer aangekomen, kunnen zulke deeltjes aanleiding geven tot lichtverschijnselen. Het verloop van de krachtlijnen maakt duidelijk dat de geladen deeltjes voornamelijk terecht zullen komen in een ringvormig gebied rondom de magnetische noord- en zuidpool; vandaar de naam poollicht.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

gebied. Hierdoor doet een dergelijke storing zich bij de ontvangst voor als een in toonhoogte afnemend kort fluittoontje, wat tot de vakterm „whistler" geleid heeft. Andere, verwante, melodieuze fluittoontjes blijken afkomstig te zijn van storingen die ergens in de hogere atmosfeer zelf worden opgewekt, waarschijnlijk door stromen van snelle geioniseerde deeltjes [10]); men duidt dit tweede soort fluittoontjes wel eens aan met de naam „dawn chorus". Onderweg volgen al deze storingen steeds rangschikken in een soort van vezels langs de krachtlijnen van het aardmagnetische veld.

Deze vroeger niet verwachte aanwezigheid van tamelijk veel elektronen tot op zeer grote hoogten boven de aarde (zie *fig. 2a*) wordt nog op andere wijzen bevestigd. In de eerste plaats is zij in overeenstemming met de registraties van een instrument dat aan boord van Spoetnik III de in de lucht aanwezige positieve ionen opving [11]). De concentratie van deze ionen vormt een aanwijzing voor

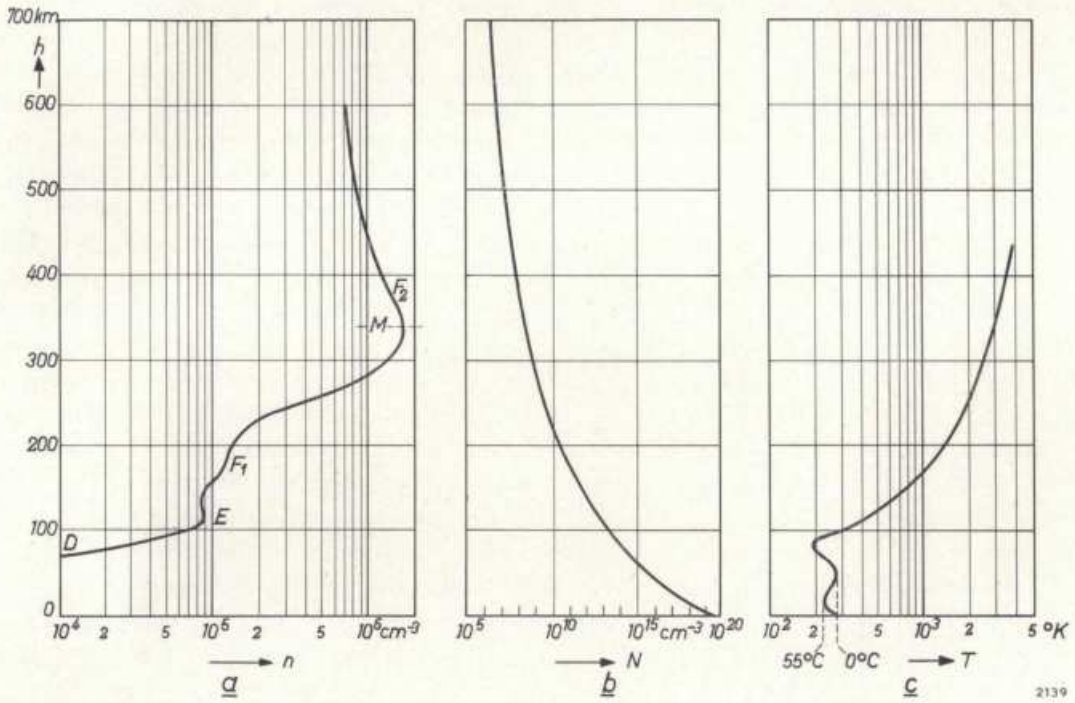


Fig. 2. Als functie van de hoogte h boven het aardoppervlak zijn horizontaal uitgezet:
a) het aantal elektronen n per cm³,
b) het aantal deeltjes N per cm³ (in het weergegeven gebied voornamelijk moleculen op geringe, voornamelijk atomen op grotere hoogten),
c) de temperatuur T (in °K; voor kleine hoogten ook in °C).
In (*a*) duiden D, E, F_1 en F_2 de gelijknamige lagen van de ionosfeer aan, met de grootste elektronenconcentratie op het niveau M (het „midden" van de F_2-laag). Het verloop van de elektronenconcentratie verandert met de zonnestand en met de activiteit van de zon; de afgebeelde kromme is representatief voor een toestand overdag waarbij de F-laag kan worden onderverdeeld in een F_1- en een F_2-gebied.

ongeveer een krachtlijn van het aardmagnetische veld. Hier geldt met recht dat wie een verre reis gemaakt heeft, veel kan vertellen. Voor een „whistler" betreft dit ervaringen over de elektronen die hij onderweg ontmoet heeft. In het bijzonder leert de analyse van het aangekomen signaal dat de grote reis slechts mogelijk is wanneer deze overal door gebieden voert waarin een minimale elektronenconcentratie heerst van het bovengenoemde bedrag van 500 elektronen per cm³. Hierbij is het van groot belang dat de elektronen de neiging hebben zich te de gelijktijdige aanwezigheid van een concentratie van negatief geladen elektronen. Bovendien kan ook tot deze elektronendichtheid geconcludeerd worden uit een recent onderzoek door Siedentopf, Behr en Elsässer betreffende de helderheid en de polarisatie van het zodiakale licht [12]). Bij dit onderzoek moet men onderstellen dat de polarisatie-effecten uitsluitend van elektronen afkomstig zijn, en niet ten dele van de eveneens aanwezige stofdeeltjes. Daardoor zijn de op deze wijze berekende elektronendichtheden maximale waarden. Aldus is een

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

minimale elektronendichtheid van omstreeks 500 per cm³ tot op grote afstanden van de aarde aannemelijk geworden uit de waarneming van drie onderling geheel onafhankelijke verschijnselen.

Bij de tot nu toe genoemde onderzoekingen worden uiteindelijk elektronenconcentraties op een bepaalde hoogte boven de aarde afgeleid. Het is echter ook mogelijk om rechtstreeks het totale aantal te bepalen van die elektronen die zich bevinden in een zuil welke zich vanaf het aardoppervlak tot ver in de kosmische ruimte uitstrekt. Men maakt daarbij gebruik van de recente radarproeven waarbij men een radiosignaal tegen de maan laat reflecteren. Het naar de aarde terugkomende signaal vertoont een sluiering, waaruit men het aantal elektronen kan afleiden dat zich bevindt binnen een nauw zuiltje dat zich uitstrekt van de aarde tot de maan. Metingen van Evans [13]) en van Bauer en Daniels [14]) hebben geleerd dat dit aantal elektronen omstreeks 20×10^{12} bedraagt in een zuiltje van 1 cm² doorsnede. Onderstelt men eens even dat over het gehele traject aarde-maan (380 000 km) een elektronendichtheid van 500 per cm³ heerste, dan zou het zuiltje 19×10^{12} elektronen bevatten. Deze uitkomst laat dus bijna geen marge voor de veel grotere elektronendichtheid die in het zuiltje in werkelijkheid plaatselijk aanwezig zal zijn, namelijk in de E- en de F-laag; deze marge is er echter wèl indien men buiten deze lagen een elektronendichtheid van b.v. 400 per cm³ aanneemt, dus nog geheel van dezelfde orde van grootte als de bovengenoemde 500 per cm³.

De gevonden uitkomsten betekenen dat het totale aantal elektronen boven het „midden" van de F-laag 3 tot 5 maal zo groot is als het bekende aantal elektronen beneden dit niveau (onder „midden" verstaan we hier het niveau van maximale elektronenconcentratie, in fig. 2*a* aangeduid met *M*). Volgens een analoge methode [15]) kan men het totale aantal elektronen tussen de aarde en een op een bepaalde hoogte rondlopende kunstmatige aardsatelliet bepalen. Dit aantal kan bovendien nog berekend worden uit het tijdstip waarop de door een dergelijke satelliet uitgezonden signalen het laatst waargenomen worden wanneer de satelliet achter de horizon verdwijnt [16]). Hetzelfde geldt voor het tijdstip waarop de signalen voor het eerst bij de opkomst boven de horizon opnieuw opgevangen kunnen worden. Op deze wijze is met behulp van Spoetnik II vastgesteld dat de elektronendichtheid in de bovenste helft van de F-laag veel langzamer afneemt dan zij in de onderste helft naar boven toeneemt. Dit is in overeenstemming met de genoemde metingen van Bowles [8]).

Dichtheid en temperatuur van de atmosfeer als functie van de hoogte

Vele gegevens staan ons derhalve ter beschikking om de elektronenconcentraties in onze dampkring te leren kennen. Door hun betrekkelijk grote zekerheid vormen deze gegevens een voortreffelijk uitgangspunt voor het verkrijgen van een beeld van de fysische omstandigheden in de ruimte nabij onze planeet. In de eerste plaats kunnen uit een eenmaal bekende verdeling van de elektronenconcentraties binnen een bepaalde laag tevens de moleculaire dichtheid en de temperatuur nabij het midden van die laag afgeleid worden. Dit is mogelijk doordat de vorming van de laag mede afhangt van het vermogen van haar moleculen of atomen om de ioniserende zonnestraling te absorberen. Hierbij speelt zowel de gemiddelde concentratie van deze ongeladen deeltjes een rol, alsook de door de temperatuur bepaalde verandering van hun concentratie met de hoogte. Op deze wijze heeft men gevonden dat de gasdichtheid op 100 km hoogte ongeveer een miljoen maal kleiner is dan nabij het aardoppervlak (fig. 2*b*) terwijl de temperatuur er ongeveer gelijk moet zijn aan kamertemperatuur (fig. 2*c*). Dit wil niet zeggen dat men zich in een dergelijke vrijwel luchtledige ruimte behaaglijk zou voelen; het betekent slechts dat de snelheden van de moleculaire warmtebeweging er ongeveer even groot zijn als in de lucht waarin wij leven. Boven het niveau van 100 km moet de temperatuur echter toenemen: was dit namelijk niet het geval, dan zou de dichtheid van de ongeladen gasatomen naar boven toe veel sneller afnemen dan in werkelijkheid het geval is.

Behalve de uitkomsten, verkregen met radiogolven, zijn er nog andere gegevens die erop wijzen dat het afnemen van de luchtdichtheid boven ca. 100 km zo langzaam geschiedt dat dit noodzakelijkerwijze gepaard moet gaan met een stijging van temperatuur. Behalve luchtdrukmetingen aan boord van raketten staan b.v. nog waarnemingen van het poollicht en van het nachtelijk hemellicht ter beschikking [17]). Wat het laatste betreft, bedenke men dat op een heldere maanloze nacht slechts ongeveer 30% van het zwakke nachtelijke licht afkomstig is van de sterren (rechtstreeks en door verstrooiing in de atmosfeer), daarentegen ongeveer 40% rechtstreeks van lichtgevende gassen die op grote hoogten in onze dampkring voorkomen (de overige 30% is licht dat door andere oorzaken is verstrooid). Uit de daarvan afkomstige lichtverschijnselen kunnen wederom schattingen gemaakt worden van de dichtheid en temperatuur der gassen tot een hoogte van ongeveer 1000 km. De temperatuurstijging boven 100 km is geheel begrijpelijk omdat het uiterst dunne

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

atmosferische gas ten slotte moet overgaan in het zogenaamde interplanetaire gas, dat de ruimte tussen de planeten vult. Het is bekend dat dit laatste gas een zeer hoge temperatuur heeft. Voorts bestaat het vrijwel geheel uit de eenvoudigste geladen deeltjes, namelijk protonen en elektronen. Men stelt zich voor dat de aan hun hoge temperatuur beantwoordende grote snelheden van deze deeltjes zodanig zijn dat zij de aantrekking door de planeten kunnen overwinnen; daarentegen worden zij nog wel door de zon vastgehouden. Het interplanetaire gas is waarschijnlijk hoofdzakelijk van de zon zelf afkomstig en vormt een voortzetting van het ijle, zeer warme, coronagas, dat de zichtbare zon in haar nabijheid omgeeft.

Laten we thans het globale beeld beschouwen dat men zich van de atmosfeer boven ongeveer 500 km hoogte gevormd heeft op grond van theoretisch inzicht en van de schaarse, van raketten afkomstige gegevens. Terwijl de chemische samenstelling van de lucht tot op ongeveer 200 km hoogte nog zeer weinig verschilt van die van de ons omgevende lucht, worden hogerop de tot atomen gedissocieerde zuurstof en stikstof geleidelijk vervangen door de veel lichtere atomaire waterstof. Boven een hoogte van de orde van 1000 km is de dichtheid zo afgenomen dat de kans dat gasdeeltjes elkaar ontmoeten, uiterst gering is. Er hebben daardoor vrijwel geen uitwisselingsprocessen meer plaats tussen de nog aanwezige atomen, ionen en elektronen. Dit heeft tot gevolg dat de concentratie van de ongeladen atomen verder naar boven geheel bepaald wordt door de zwaartekracht; op zeer grote hoogten komt daardoor vrijwel alleen nog het lichtste gas voor, namelijk waterstof. Op een afstand van drie aardstralen, dat is op een hoogte van ongeveer 20 000 km, is de aantrekking door de aarde zo gering geworden dat de (ongeladen) waterstofatomen, in verband met de daar heersende temperatuur van ongeveer 1200 °C, voldoende snelheid hebben om de aantrekking door de aarde geheel te overwinnen. Voor de (elektrisch geladen) ionen en elektronen daarentegen is de werking van het aardmagnetische veld en de daarmee samenhangende krachten belangrijker dan de zwaartekracht. Deze deeltjes blijven nog veel langer in de invloedssfeer van de aarde. Ten slotte zullen daarom nog slechts de lichtste en tevens geladen deeltjes overblijven, dus protonen en elektronen. De laatste komen daar dan voor in de meermalen genoemde concentratie van ongeveer 500 deeltjes per cm³. Volledigheidshalve vermelden we nog dat geigertellers aan boord van raketten het bestaan van ten minste twee gordels van zeer intense radioactieve straling hebben aangetoond [18]): de naar Van Allen genoemde zones (fig. 1), waarvan de stralingsmaxima zich op ongeveer 3000 en 16 000 km van het aardoppervlak bevinden. De straling wordt waarschijnlijk in hoofdzaak veroorzaakt door snelle elektronen die afkomstig zijn van de zon.

De overgang van de atmosfeer naar het interplanetaire gas

Het hier beschreven model zou wijzen op een zeer langzame overgang van de naar boven steeds ijler wordende dampkring naar het interplanetaire gas, dat volgens het genoemde onderzoek van Siedentopf en medewerkers [12]) nabij de aarde eveneens een dichtheid van ongeveer 500 elektronen per cm³ bezit. Men bedenke echter dat dit laatste gas niet aan de dagelijkse aardrotatie deelneemt, terwijl daarentegen de lucht nabij de aarde door deze geheel en al meegevoerd wordt. De vastkoppeling van de lucht aan de aarde zal dus met toenemende hoogte geleidelijk minder moeten worden. Daarbij doet zich een theoretische moeilijkheid voor. Indien het aardmagnetische veld met toenemende afstand even geleidelijk blijft afnemen als nabij de aarde, kan men berekenen welke elektrische wrijvingskrachten opgewekt worden in verband met de minimale dichtheid van 500 elektronen per cm³. Men vindt dan dat deze krachten zo sterk zijn dat de atmosferische lucht tot dichtbij het aardoppervlak meer aan het niet met de aarde meebewegende interplanetaire gas dan aan de beweging van de aarde gekoppeld zou zijn. De beweging van de lucht die niet volledig met de aarde meeroteert, zou zich moeten openbaren door het overheersen van een oostenwind. Deze zou reeds op een hoogte van 100 km boven de aarde waarneembaar moeten zijn. Hiervan is geen sprake. Deze moeilijkheid verdwijnt indien er ergens een overgangsgebied zou bestaan waarin het aardmagnetische veld zo snel afneemt dat zijn werking daarbuiten geen rol meer speelt. Het bij dit model passend verloop van de magnetische krachtlijnen zal maken dat de nabij het overgangsgebied aanwezige protonen en elektronen slechts met moeite door dit laatste heen kunnen dringen; de beperkte mogelijkheid van het toch nog doordringen is dan essentieel voor de poollichtverschijnselen. De deeltjes buiten het overgangsgebied worden dus meer of minder geïsoleerd van die erbinnen. Daardoor wordt het mogelijk dat alle deeltjes erbinnen de beweging van de roterende aarde meemaken, maar dat die erbuiten gekoppeld zijn aan het interplanetaire gas. De overgangslaag, mogelijk samenvallend met het centrale gedeelte van de buitenste zone van Van Allen, op ongeveer 16 000 km afstand, vervult dan

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

de rol van een natuurlijke begrenzing van onze met de aarde meeroterende dampkring, op een plaats waar deze vrijwel alleen uit protonen en elektronen bestaat.

Omdat de bedoelde overgangslaag het aardmagnetische veld dus afschermt, is zij theoretisch slechts mogelijk wanneer zij tevens de drager is van elektrische stromen. Juist daarom heeft men het bestaan van een dergelijke laag het eerst ondersteld, want deze stromen kunnen het eenvoudigst alle verschijnselen verklaren die samenhangen met de als „magnetische stormen" bekende storingen in het aardmagnetisme. De desbetreffende theorie is sinds 1923 vooral ontwikkeld door Chapman, Ferraro en Martyn [19]). Zij hebben aangetoond dat die overgangslaag noodzakelijkerwijs moet ontstaan, telkens wanneer een stroom van geladen deeltjes (weggeschoten door de zon) valt in een magnetisch veld dat aanvankelijk als functie van de afstand tot de aarde zeer geleidelijk afneemt. Iedere stroom van deeltjes zal aldus een vervorming van dit laatste veld tot een veld van het boven beschouwde type bevorderen. De regelmatige herhaling van de zonneerupties houdt op deze wijze het veldtype met een overgangslaag in stand. De meest recente waarnemingen wijzen erop dat de overgangslaag misschien identiek is met een randgebied waarin het aardmagnetische veld zijn regelmatige en met de tijd weinig veranderende structuur verliest. Anders gezegd: dit randgebied vormt ongeveer de uiterste zone waarin het aardmagnetische veld nog een duidelijk stabiele component heeft.

Ionosferische winden

Zojuist kwam ter sprake dat er geen aanwijzingen zijn voor het overheersen van een oostenwind op 100 km hoogte. Dit blijkt uit verschillende onderzoekingen, wederom met behulp van radiogolven die een reflexie in de ionosfeer hebben ondergaan [20]). In de eerste plaats kan men de sluiering van deze golven bestuderen. Onregelmatigheden in de structuur van de ionosfeer maken dat de tijdstippen waarop het signaal van een gegeven zender het sterkst doorkomt, niet samenvallen voor enige in elkaars nabijheid gelegen radio-ontvangers. Uit de onderlinge verschillen van deze tijdstippen kan zowel de richting als de sterkte van de wind op ionosferische hoogte bepaald worden. Windsnelheden van de orde van 50 m/s, dat is 180 km/h, blijken dan normaal te zijn op een hoogte van 100 km. Dergelijke orkanen moet men zich echter niet te dramatisch voorstellen. Immers doordat de luchtdichtheid aldaar ongeveer een miljoen maal geringer is dan aan het aardoppervlak, is de massa van de per tijdseenheid verplaatste lucht ondanks deze grote snelheid zeer gering. Omhooggeschoten raketten zullen er niet merkbaar door worden afgebogen uit hun baan.

Radar als middel om meteoren waar te nemen

Een zeer systematische bestudering van de ionosferische winden in de E-laag is in de laatste jaren opgezet door middel van radaronderzoek aan meteoren [21]). Ondanks haar ijlheid is de lucht op een hoogte van ongeveer 115 km toch reeds dicht genoeg om de van buiten binnendringende meteoren tot gloeihitte te kunnen brengen. De verdamping is daarbij zo sterk dat de meeste meteoren geheel vervluchtigd zijn alvorens zij op hun dalende weg een hoogte van ongeveer 80 km bereiken. Bij de verhitting wordt een gedeelte van de meteooratomen geïoniseerd en wordt er een tijdelijk spoor van sterk geïoniseerde lucht achtergelaten. Dit spoor blijft na de passage nog enige tijd hangen, soms tien seconden. Daarna vervaagt het, doordat de gevormde elektronen door diffusie verspreid worden. Er bestaat aldus gedurende korte tijd een cilindervormig, zich uitzettend, kolommetje waarin elektronen voorkomen in een concentratie die vaak tienduizend maal groter is dan in de omgevende ionosferische lucht. Radargolven kunnen tegen een dergelijk tijdelijk bestaand zuiltje gereflecteerd worden. Het aantal meteoren dat aldus opgespoord kan worden, is gemiddeld ongeveer één per seconde. Daarentegen is het aantal met het blote oog waarneembare meteoren beperkt tot ongeveer één per zeven minuten. Met een telescoop kan men vrijwel evenveel meteoren opsporen als met radar, maar de laatste heeft het voordeel dat hij overdag even goed als 's nachts waarnemingsmateriaal oplevert. Men kan deze waarnemingen zowel overdag als 's nachts doen.

De radarstudie van meteoren verheugt zich gedurende de laatste tien jaren in een grote belangstelling. Windonderzoek is hierbij ook mogelijk, daar de door meteoren veroorzaakte ionisatiezuiltjes gedurende hun kort bestaan door de plaatselijke wind meegevoerd worden. Men kan namelijk de component die deze windbeweging heeft in de waarnemingsrichting, afleiden uit de frequentieverandering die de teruggekaatste golven ondergaan overeenkomstig het principe van Doppler. Door de met behulp van een groot aantal meteoren gemeten windcomponenten statistisch te bewerken, kan men opnieuw voor een bepaald gebiedje in de ionosfeer sterkte en richting van de heersende wind berekenen. Men vindt dan een bevestiging van de vroeger genoemde windsnelheden van de orde van 50 m/s. Het meest rechtstreeks neemt men deze windsnelheden echter waar aan de zogenaamde „lichtgevende wol-

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

ken", die soms 's zomers op grote hoogten enige uren na zonsonder- of voor zonsopgang zichtbaar zijn [22]).

Getijden in de atmosfeer

De hier besproken windverschijnselen hebben gedeeltelijk hetzelfde toevallige karakter als die van de door meteorologische omstandigheden bepaalde wind nabij het aardoppervlak. De ionosferische winden kunnen echter voor een belangrijk gedeelte aan de getijdekrachten van de zon en de maan toegeschreven worden. Getijdekrachten zijn ons het meest bekend uit de periodieke afwisseling van eb en vloed in de zeeën. Dezelfde krachten werken op de lucht van onze dampkring, maar vallen daar veel minder op. Wat de dampkring betreft, kunnen we onze waarnemingspositie vergelijken met die van iemand die de watergetijden tracht te bestuderen op de bodem van de zee. Deze vergelijking suggereert dat de getijde-effecten in de dampkring op grotere hoogten misschien veel geprononceerder zijn. Een periodieke verticale luchtbeweging ten gevolge van de getijden zou zich b.v. kunnen openbaren door een periodiek variërende hoogte van elk der ionosferische lagen. Inderdaad is het gelukt uit de echotijdmetingen een periodieke rijzing en daling van deze lagen te constateren, voor het eerst in 1939. In dat jaar vonden Appleton en Weekes [23]) dat de hoogte van de E-laag kleine variaties van de orde van 2 km vertoont, die rechtstreeks samenhangen met de stand van de maan.

Evenmin als in zeewater zijn de verticale getijdebewegingen in de lucht denkbaar zonder gelijktijdige horizontale verplaatsingen. Men zou dus getijde-effecten kunnen vermoeden als achtergrond van de windverschijnselen die ons geopenbaard worden door de radarwaarnemingen aan meteoren. Ionosferische getijwinden blijken inderdaad te bestaan. De van de zon en van de maan afkomstige effecten kunnen daarbij van elkaar gescheiden worden doordat hun bijdragen respectievelijk met de stand van de zon en die van de maan meeveranderen. De door de zon veroorzaakte getijdewind vertoont een zeer regelmatig patroon, dat voor een hoogte van 85 km op het noordelijk halfrond als volgt in grote trekken beschreven kan worden: er heerst een voortdurend van richting veranderende, ruimende windbijdrage, die 's morgens en 's avonds om half negen plaatselijke tijd uit het westen komt; de maximale sterkte van deze wind is ongeveer 70 km/h.

Van dergelijke sterke getijdewinden kan nabij het aardoppervlak geen sprake zijn; aldaar geven de meteorologische omstandigheden de doorslag voor de optredende winden. Toch valt ook hier wel degelijk een getijdebijdrage te constateren, ondanks het feit dat deze zeer gering is. Men vindt haar door over een lange periode barometergemiddelden te bepalen voor tijdstippen waarop òf de zon òf de maan steeds een zelfde stand heeft. Dergelijke gemiddelden vertonen niet meer de invloed van toevallige, steeds wisselende meteorologische oorzaken. Er blijkt aldus een klein getijde-effect te bestaan dat aan de zon toegeschreven moet worden, en daarnaast een nog 16 maal zo klein effect dat van de maan afkomstig is. Uit de plaatselijke verdeling van deze nauwkeurig te bepalen statistische barometergemiddelden kan achteraf de daarmede samenhangende, zeer geringe, getijdebijdrage tot de wind aan het aardoppervlak berekend worden [24]). Men vindt dan dat aan de equator, gesuperponeerd op de door meteorologische effecten bepaalde wind, de getijdewerking van de *zon* een geringe extra-oosten- of -westenwind opwekt, die tijdens zijn maxima een sterkte heeft van nog geen kilometer per uur. Op hogere geografische breedten verandert deze zwakke extragetijdewind voortdurend van richting, evenals in de ionosfeer. De nog veel kleinere atmosferische getijde-effecten die door de *maan* opgewekt worden [25]), wijzen erop dat onze trouwe satelliet niet in staat is om enige invloed van betekenis op de luchtverdeling in onze dampkring uit te oefenen.

Een vergelijking van de snelheden tot 70 km/h voor de getijdewinden op 85 km hoogte, met de zwakke getijdewind van de orde van een kilometer per uur nabij de aarde, zou kunnen suggereren dat de getijde-effecten primair in de hogere lagen van de dampkring opgewekt worden. Dit is echter geenszins het geval. Wanneer men de ijlheid van de hogere lucht in aanmerking neemt, blijkt de energie die door de getijdekrachten aan 1 m^3 lucht wordt medegedeeld, aan de grond veel groter te zijn dan op ionosferische hoogten. De nabij de grond opgenomen energie dringt echter geleidelijk door naar boven, waarbij de van de zon afkomstige getijdewind aanzienlijk versterkt wordt, althans boven een hoogte van ongeveer 30 km. Het is echter lange tijd een raadsel geweest waardoor de bijdrage van de zon tot het atmosferische getij zoveel groter is dan die van de maan. Dit leek geheel in tegenspraak met de elementaire theorie, volgens welke de bijdrage van de maan $2\frac{1}{2}$ maal zo groot zou moeten zijn als die van de zon; dit volgt uit de massa's van de zon en de maan, en uit hun afstanden tot de aarde. Inderdaad is de maan het meest effectief bij de oceanische getijden. We weten toch dat langs onze kusten de tijdstippen van hoog water vrijwel alleen door de maanstand bepaald worden; het er nog bijkomende zwakkere effect van de zon veroorzaakt onder meer de springvloeden kort na volle maan en nieuwe maan. Dat bij

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

de atmosferische getijden de zon daarentegen de hoofdrol speelt, heeft reeds anderhalve eeuw geleden Laplace verwonderd. In 1882 sprak Kelvin het vermoeden uit dat hier een resonantieverschijnsel in het spel zou zijn. Hij stelde zich voor dat de atmosferische lucht gemakkelijk in een schommelende beweging zou kunnen geraken waarvan de periode door een of andere oorzaak toevallig dicht bij de hoofdperiode van twaalf uur gelegen is die de zonnegetijden beheerst. Daarentegen zou de overeenkomstige periode van bijna dertien uur voor de maangetijden zich niet nabij een dergelijke resonantieperiode van de atmosfeer bevinden. Het duurde echter nog tot 1936 voor Pekeris voor het eerst kon verklaren dat onder de resonantieperiodes van de atmosfeer er inderdaad een is van ongeveer twaalf uur [26]).

De duur van deze voor de getijden zo belangrijke resonantieperiode hangt ten nauwste samen met de temperatuurverdeling in de hogere luchtlagen [27]). De bedoelde duur zou geheel anders zijn wanneer de luchttemperatuur naar boven toe voortdurend bleef afnemen. We weten thans dat de temperatuur een laagste waarde van ongeveer —55 °C heeft op gemiddeld 10 km hoogte, vervolgens stijgt en op ongeveer 50 km hoogte een gemiddelde waarde in de buurt van het vriespunt bereikt (fig. 2*c*). Daarna gaat de temperatuur naar boven toe opnieuw dalen, om op ongeveer 85 km een laagste waarde van ongeveer —80 °C te bereiken. Hierna begint de vroeger genoemde temperatuurstijging, die voortduurt tot aan de overgang naar het interplanetaire gas. Het is de aanwezigheid van twee lagen waarin de temperatuur naar boven toe daalt, die maakt dat de duur van de genoemde resonantieperiode ongeveer twaalf uur bedraagt. De resonantietheorie leert ook dat de door de zon opgewekte getijdewind op 75 km hoogte ongeveer 100 maal zo sterk moet zijn als nabij de aarde. Daarbij vindt men nog dat deze wind boven ongeveer 30 km hoogte in tegenovergestelde richting moet waaien als nabij de grond. Dit is geheel in overeenstemming met de windrichtingswaarnemingen in de ionosfeer, hetgeen het vertrouwen in de juistheid van de resonantietheorie nog vergroot.

In grote trekken kan men zeggen dat theorie en waarnemingen samen tot een bevredigend beeld van de atmosferische getijden in de lagere dampkring geleid hebben. Overeenkomstig de zg. dynamotheorie [28]) bepalen de ionosferische getijdewinden mede de in de ionosfeer voorkomende stelsels van elektrische wervelstromen; men vindt dan een bevredigende samenhang met hetgeen over deze stromen kan worden afgeleid uit aardmagnetische waarnemingen. De radarmetingen aan meteoren wijzen er voorts nog op dat de getijdewinden boven 100 km snel afnemen; blijkbaar treedt er een sterke demping op wanneer de getijdegolven in dit gebied trachten door te dringen. Dit kan verklaard worden uit de rol die wrijving en warmtegeleiding eerst daar gaan vervullen. Ongetwijfeld zal toekomstig onderzoek zich nog meer gedetailleerd met de verzwakking van de getijde-effecten op grote hoogten bezighouden.

Slotbeschouwing

De lezer zal zich na deze uiteenzettingen misschien afvragen of de besproken onderzoekingen behalve een zuiver wetenschappelijk ook een technisch belang hebben. Men bedenke hierbij dat een onderzoek met *behulp* van radiogolven inzicht kan geven over nieuwe mogelijkheden om deze golven te *gebruiken* als telecommunicatiemiddel. In dit verband denk ik eraan hoe de reeds lang bekende reflexie en verstrooiing van radiogolven aan geïoniseerde wolken de Amerikaan Thaler ertoe gebracht hebben, dit verschijnsel te gebruiken voor het opsporen van geleide projectielen en nucleaire explosies [29]); beide doen namelijk zulke wolken ontstaan.

Dit overzicht moge een indruk hebben gegeven hoe de radio een machtig hulpmiddel is gebleken om vele geheimen te doorgronden van de voor ons bestaan zo belangrijke dampkring. Boven onze hoofden spelen zich heel wat lang onbekend gebleven verschijnselen af, waarvan wij slechts langzaam-aan iets te weten zijn gekomen. Het is een studieterrein dat voor de natuurwetenschapsbeoefenaar hoogst interessant is, omdat uiteenlopende gebieden hier ter sprake komen. We noemen de stralingstheorie en plasmafysica, die vooral voor de hoogste lagen van belang zijn, de fysisch-chemische theorieën, die de ionisatie en energie-uitwisselingsprocessen tussen de vele op wat geringere hoogten voorkomende deeltjes begrijpelijk maken, de aërodynamische en elektrodynamische theorieën, die de luchtstromingen boven 100 km moeten verklaren, de klassieke mechanica, die de getijde-effecten in de onderste lagen beheerst, enz. Niemand is er geheel onverschillig voor dat het menselijk vernuft in staat is geweest radiocommunicatie over de gehele aarde tot stand te brengen. Het menselijk intellect wil nader begrijpen waardoor dit mogelijk is. Eén algemene opmerking is hierbij wenselijk tot slot. Het is opvallend hoezeer uiterst subtiel lijkende verschijnselen een fundamentele rol spelen bij de telecommunicatie door middel van radiogolven. We worden er b.v. door getroffen dat het zeer ijle gas van de ionosferische F-laag, dat een geringere dichtheid heeft dan het zogenaamde luchtledig van de beste hoogvacuümpompen, ons in staat stelt om door middel van de

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

daarin nog weer zeer sterk verdund voorkomende elektronen een zender aan de andere zijde van onze aardbol te beluisteren.

LITERATUUR

1) G. N. Watson, Proc. Roy. Soc. **A 95**, 83, 1918.
2) E. V. Appleton en M. A. F. Barnett, Nature **115**, 333, 1925 en Proc. Roy. Soc. **A 109**, 621, 1925.
3) G. Breit en M. A. Tuve, Phys. Rev. **28**, 554, 1926.
4) W. H. Eccles, Proc. Roy. Soc. **A 87**, 79, 1912.
5) Balth. van der Pol, De invloed van een geïoniseerd gas op het voortschrijden van elektromagnetische golven en toepassingen daarvan op het gebied der draadloze telegrafie en bij metingen aan glimlichtontladingen, dissertatie Utrecht 1920.
6) W. de Groot, Phil. Mag. (7) **10**, 521, 1930.
7) J. C. Seddon, J. geophys. Res. **58**, 323, 1953. H. Friedman, Proc. Inst. Rad. Engrs. **47**, 272, 1959 (no. 2).
8) K. L. Bowles, Phys. Rev. Letters **1**, 454, 1958.
9) M. G. Morgan en G. McK. Allcock, Nature **177**, 30, 1956.
10) Zie b.v. R. M. Gallet, Proc. Inst. Rad. Engrs. **47**, 211, 1959 (no. 2).
11) V. I. Krassovsky, Proc. Inst. Rad. Engrs. **47**, 289, 1959 (no. 2).
12) H. Siedentopf, A. Behr en H. Elsässer, Nature **171**, 1066, 1953.
13) J. V. Evans, Proc. Phys. Soc. **B 69**, 953, 1956.
14) S. J. Bauer en F. B. Daniels, J. geophys. Res. **64**, 1371, 1959 (no. 10).
15) W. W. Berning, Proc. Inst. Rad. Engrs. **47**, 280, 1959 (no. 2).
16) Ia. L. Alpert, F. F. Dobriakova, E. F. Chudesenko en B. S. Shapiro, C. R. Acad. Sci. USSR **120**, 743, 1958.
17) Zie b.v. S. K. Mitra, The upper atmosphere (Asiatic Soc., Calcutta, 2de druk, 1952), hoofdstuk X, par. 1.
18) J. A. Van Allen, J. geophys. Res. **64**, 1683, 1959 (no. 11).
19) Zie b.v. S. Chapman en V. C. A. Ferraro, Terr. Magn. atmos. Electr. **36**, 171, 1931.
20) Zie b.v. C. O. Hines, Proc. Inst. Rad. Engrs. **47**, 176, 1959 (no. 2).
21) Zie b.v. L. A. Manning en V. R. Eshleman, Proc. Inst. Rad. Engrs. **47**, 186, 1959 (no. 2).
22) Zie b.v. het in 17) aangehaalde boek, hoofdstuk VI, par. 14b.
23) E. V. Appleton en K. Weekes, Proc. Roy. Soc. **A 171**, 171, 1939.
24) Zie b.v. J. Bartels, Handbuch der Experimentalphysik, 25. Geophysik, deel 1 (Akad. Verlagsges., Leipzig 1928), blz. 208.
25) Zie het in 24) aangehaalde boek, blz. 182.
26) C. L. Pekeris, Proc. Roy. Soc. **A 158**, 650, 1937.
27) Zie b.v. K. Weekes en M. V. Wilkes, Proc. Roy. Soc. **A 192**, 80, 1947.
28) Zie b.v. J. A. Fejer, J. atmos. terr. Phys. **4**, 184, 1953.
29) Time (Atlantic edition), 17 aug. 1959.

Samenvatting. Hoofdzakelijke inhoud van de rede, door de auteur uitgesproken bij de aanvaarding van het ambt van buitengewoon hoogleraar aan de Technische Hogeschool te Eindhoven. Het onderwerp is de achtergrond van het atmosfeeronderzoek waarbij gebruik is gemaakt van radiogolven. Na het historische ionosfeeronderzoek van Appleton en Barnett en dat van Breit en Tuve te hebben gememoreerd, maakt de auteur melding van het recente werk van Bowles, die door radarpeilingen vanaf de aarde gegevens heeft kunnen krijgen over het buitenste deel van de F-laag. Deze bevestigen de waarnemingen door middel van instrumenten in aardsatellieten, namelijk dat de elektronendichtheid aan de buitenzijde van de F-laag veel langzamer met de hoogte verandert dan aan de binnenzijde. Tot de belangrijke ontdekkingen die aan de ontwikkeling van de ruimtevaart zijn te danken, behoren de naar Van Allen genoemde zones van intensieve straling, op afstanden van meer dan 2000 km van de aarde. Vervolgens komen nog ter sprake de overgang van de atmosfeer naar het interplanetaire gas, het bestaan van winden en getijden in de ionosfeer, en het gebruik van radar voor het waarnemen van meteoren.

RECTIFICATIE

Bij het artikel „Een 75-cm-ontvanger voor radioastronomie en enige hiermee verkregen resultaten", Philips techn. T. **21**, 1959 (no. 11), blz. 313-329, is ons verzocht nog te vermelden dat het radioastronomische werk van de Stichting Radiostraling van Zon en Melkweg mogelijk is gemaakt door de financiële steun van de Nederlandse Organisatie voor Zuiver Wetenschappelijk Onderzoek.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

MICROFONIE VAN ELEKTRONENBUIZEN

door S. S. DAGPUNAR *), E. G. MEERBURG **) en A. STECKER ***).

621.391.816.2:621.385

Onder microfonie verstaat men het optreden van een storend signaal doordat een onderdeel van een elektrische schakeling, b.v. een versterkbuis, is onderworpen aan mechanische of akoestische trillingen en deze omzet in elektrische trillingen. Het verschijnsel is al zo oud als de radiobuis zelf. Aanvankelijk kon men het nog baas blijven door de buizen te plaatsen in verende houders. Bij de tegenwoordig gebruikelijke versterkingen is zulk een eenvoudige maatregel verre van voldoende. Theoretisch en experimenteel onderzoek hebben geleerd hoe men buizen kan construeren die in veel mindere mate microfonie vertonen. Het onderstaande artikel, dat bijdragen bevat uit een Engels, een Nederlands en een Duits laboratorium, geeft een beeld van dit onderzoek en van de vooruitgang die de laatste jaren met het tegengaan van microfonie is bereikt.

Inleiding

Onder de schakelelementen waaruit radiotoestellen, versterkers, enz. zijn samengesteld, treft men er aan die in mechanisch opzicht niet één star geheel vormen maar uit delen bestaan die ten opzichte van elkaar kunnen trillen, met een frequentie die in het algemeen in het hoorbare gebied ligt. Bij het trillen varieert de afstand tussen de delen, en dit gaat gepaard met fluctuaties in de elektrische eigenschappen van het betrokken schakelelement. Men denke b.v. aan een draaicondensator: wanneer de platen hiervan ten opzichte van elkaar trillen, varieert periodiek de capaciteit. Is de condensator opgenomen in de trillingskring van een oscillator, dan zal dus ook de frequentie van de gegenereerde spanning periodiek variëren, d.w.z. onderhevig zijn aan frequentiemodulatie. Deze kan op hinderlijke wijze tot uiting komen in het uitgangssignaal. Dit optreden van een storend signaal als gevolg van mechanisch trillende onderdelen staat bekend als microfonie.

Meer nog dan draaicondensatoren zijn elektronenbuizen aan microfonie onderhevig; uitsluitend met deze laatste zullen wij ons in dit artikel bezighouden. Trillen de elektrodes van een buis ten opzichte van elkaar, dan veroorzaakt dit niet alleen variaties in de capaciteiten tussen de elektrodes, maar ook fluctuaties van de anodestroom en de steilheid, dus rechtstreeks van de versterking.

De oorzaken die een buis in trilling kunnen brengen, zijn velerlei. Behalve aan toevallige trillingen of schokken, denke men aan die waaraan autoradio's, mobilofoons, radioapparatuur in vliegtuigen, enz., blootstaan, verder aan de trillingen afkomstig van grammofoon- of magnegrafoonmotoren, aan de schokken veroorzaakt door het bedienen van schakelaars in diverse toestellen, en bovenal aan de luidspreker. Deze bevindt zich dikwijls in de onmiddellijke nabijheid van versterkbuizen en kan hieraan trillingen meedelen zowel langs „akoestische" weg (via de lucht) als langs „mechanische" weg (via de kast, het chassis en de buishouders). De situatie is hierbij bovendien nog bijzonder gevaarlijk doordat de luidspreker het storende microfoniesignaal zelf weergeeft, zodat, bij voldoend grote versterking, „rondzingen" zal optreden. Is de versterking voor dit laatste niet voldoende groot, dan kan toch een hinderlijke nagalm ontstaan. Zeer storend kan de microfonie ook tot uiting komen in televisieontvangtoestellen. Trillingen van de luidspreker kunnen hierbij worden overgebracht naar versterkbuizen in het hoogfrequentie-, middenfrequentie- of videofrequentiegedeelte van het toestel en hierdoor hinderlijke fluctuaties in de helderheid van het beeld veroorzaken. Microfonie in buizen die zijn opgenomen in de afbuigschakelingen, kan behalve helderheidsfluctuaties ook vervormingen in het beeld doen ontstaan.

In de laatste jaren zijn in vele laboratoria uitvoerige onderzoekingen verricht, zowel naar de eisen die aan buizen moeten worden gesteld om in moderne apparaten geen ontoelaatbare microfonie te veroorzaken, als naar de middelen die kunnen worden aangewend om de buizen aan deze eisen te laten voldoen. De onderzoekingen hierover in verschil-

*) Mullard Radio Valve Co., Ltd., Mitcham, Engeland.
**) Hoofdindustriegroep Elektronenbuizen, Eindhoven.
***) Ontwikkellaboratorium van de Valvo GmbH, Radioröhrenfabrik, Hamburg.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

lende Philipslaboratoria en de hieruit voortgekomen resultaten vormen het onderwerp van dit artikel [1]).

Factoren die de sterkte van de microfonie bepalen

Een aan akoestische en/of mechanische trillingen onderworpen buis ondervindt een periodiek wisselende versnelling. Het is allereerst de grootte hiervan die de sterkte van de microfonie bepaalt. Om een indruk van deze versnelling te geven, zij vermeld dat metingen met trillingsopnemers in radio-ontvangers en televisietoestellen hebben aangetoond [2]) dat bij toevoeren van een vermogen van 50 mW aan de luidspreker de buizen versnellingen ondergaan van 0,1g à 0,25g (g = versnelling van de zwaartekracht). Bij een groter vermogen zijn de versnellingen uiteraard ook groter, en wel evenredig met de wortel uit het vermogen. In autoradio's zijn de versnellingen die de motortrillingen teweegbrengen nog belangrijker dan die, veroorzaakt door de luidspreker. Een grote invloed hebben hier natuurlijk het type auto, de toestand van de motor en de verdere omstandigheden. Metingen aan het instrumentenbord van een groot aantal automobielen hebben aangetoond dat hier onder bepaalde omstandigheden versnellingen tot 25g optreden.

Behalve de sterkte van de trillingen waaraan de gehele buis is onderworpen, is voor de microfonie ook van belang de mate waarin de trillingen worden overgebracht van de buisvoet of buiswand naar de elektrodes. Verder spelen de stijfheid van de onderdelen en de starheid van hun bevestiging een rol.

Een ander punt dat bij de beoordeling van een buis uit een oogpunt van microfonie de aandacht vraagt, is de functie die deze buis in het desbetreffende apparaat vervult. Deze functie bepaalt namelijk de grootheid waarvan eventuele fluctuaties het meest hinderlijk zijn. Zo zullen bij een buis in een laagfrequentieversterker de veranderingen van de onderlinge elektrodecapaciteiten zelden van belang zijn, doch wèl de veranderingen in de anodestroom die ten gevolge van bewegingen van de elektrodes optreden. Immers, deze anodestroomvariaties worden, meestal na versterking, aan de luidspreker toegevoerd en hoorbaar gemaakt. Capaciteitsvariaties kunnen daarentegen zeer hinderlijk zijn bij de oscillatorbuis in een superheterodyne-ontvanger, speciaal wanneer de ontvanger op een hoge frequentie is afgestemd. In dit geval is immers de kringcapaciteit klein; hierdoor hebben de buiscapaciteiten een grote invloed op de frequentie van de door de oscillator opgewekte spanning. Een periodieke variatie van de laatstgenoemde capaciteiten veroorzaakt dus frequentiemodulatie, wat in een frequentiemodulatie-ontvanger tot een hoorbaar geluid uit de luidspreker leidt. Dit kan trouwens ook het geval zijn in een ontvanger voor amplitudemodulatie, en wel wanneer het toestel iets „naast" het te ontvangen signaal is afgestemd. Bij een variërende frequentie van het middenfrequentiesignaal ontstaat dan namelijk amplitudemodulatie, die na detectie weer een storende laagfrequente spanning veroorzaakt. Amplitude- en frequentiemodulatie kunnen ook ontstaan door capaciteitsvariaties in één of meer hoogfrequentie- of middenfrequentiekringen van een ontvanger. Immers, in dit geval ontstaan fluctuaties in de grootte en de faze van de uitgangsspanningen van de desbetreffende versterktrappen.

Wanneer door microfonie fluctuaties van de steilheid ontstaan, kan hiervan hinder worden ondervonden indien de buis wordt gebruikt in het hoogfrequentie- of middenfrequentiegedeelte van een ontvangtoestel voor amplitudemodulatie, daar een periodiek variabele steilheid een veranderlijke versterking geeft, dus de hoogfrequente of middenfrequente signaalspanning in amplitude moduleert.

Het optreden van microfonie in een buis is hinderlijker naarmate de beschouwde buis door meer versterktrappen wordt gevolgd. Immers, dan zal een des te kleinere variatie van één der buisgrootheden voldoende zijn om een ontoelaatbare luidsprekerwisselstroom te doen ontstaan.

Grilligheid van de microfonie

Door het vrij grote aantal factoren dat de sterkte van de optredende microfonie beïnvloedt, vertoont dit verschijnsel in de praktijk een grillig karakter. Een buis die in een bepaalde functie in een bepaald toestel geen moeilijkheden geeft, kan in een andere functie of in een ander apparaat een ontoelaatbare microfonie vertonen. Ook de plaats van de buis, en de stand waarin deze is gemonteerd, hebben een grote invloed. Verder kunnen bij een bepaald buis-

---

[1]) Zie ook de volgende publikaties:
B. G. Dammers, On the microphony of the EF 86, Electronic Appl. **16**, 125-134, 1955/56;
B. G. Dammers, A. G. W. Uitjens, E. G. Meerburg en M. A. de Pijper, Reflections on microphony, Electronic Appl. **18**, 15-18, 1957/58;
B. G. Dammers, A. G. W. Uitjens, K. Hoefnagel, E. G. Meerburg en M. A. de Pijper, Causes and effects of microphony in the R.F. and I.F. stages of television receivers, Electronic Appl. **18**, 48-56, 1957/58;
A. Stecker, Die Mikrofonie der Elektronenröhre — Theorie und Analyse, Valvo Berichte **4**, 1-21, 1958 (zie ook Electronic Appl. **18**, 99-117, 1957/58);
H. Hellmann, Die Prüffeldmessung der Mikrofonie von Elektronenröhren, Valvo Berichte **4**, 22-35, 1958;
D. Hoogmoed, Microphonic effects in electron tubes, Electronic Appl. **19**, 25-44, 1958/59.

[2]) Zie het in [1]) aangehaalde artikel van Hellmann.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

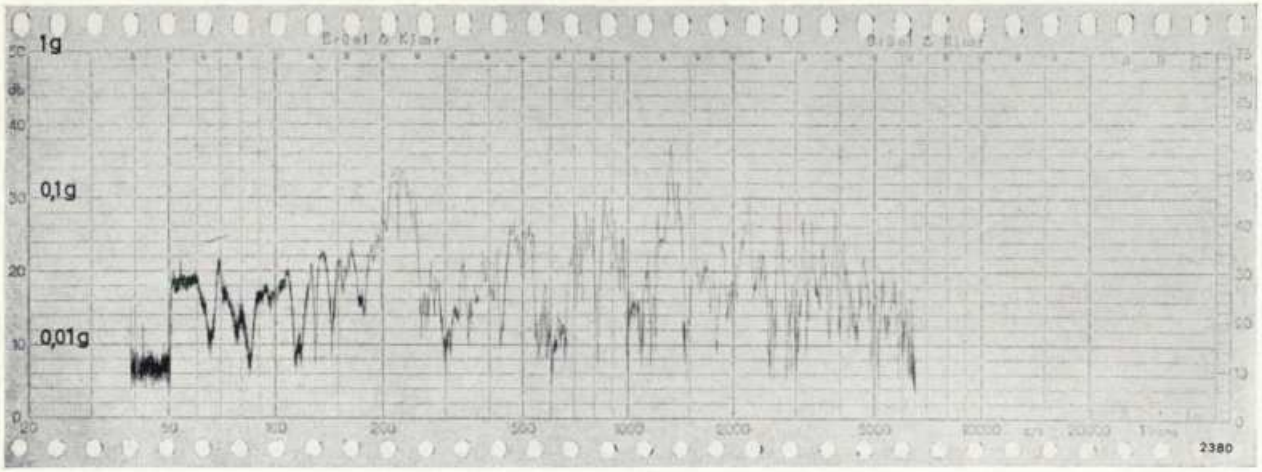


Fig. 1. Frequentiespectrum van de versnelling waaraan een buis in een bepaald type televisieontvanger is onderworpen wanneer aan de luidspreker een constant vermogen van 50 mW wordt toegevoerd bij een variërende frequentie.

type de verschillende exemplaren onderling grote verschillen vertonen. Ondanks de uiterst kleine toleranties die bij de fabricage van de onderdelen in acht worden genomen, is het namelijk niet te voorkomen dat de beweeglijkheid van de onderdelen ten opzichte van elkaar van buis tot buis een weinig verschilt. Op de elektrische eigenschappen van de buis heeft dit geen merkbare invloed, doch er kunnen grote onderlinge verschillen met betrekking tot microfonie uit ontstaan. Hierdoor kunnen sommige praktische onderzoekingsmethodes alleen op statistische basis worden uitgevoerd; of het aanbrengen van een bepaalde verandering in een buis een in de praktijk belangrijke verbetering met betrekking tot de microfonie betekent, kan men dan alleen vaststellen indien een vrij groot aantal buizen wordt onderzocht.

De grilligheid van de microfonie wordt nog geaccentueerd door het feit dat het frequentiespectrum van de trillingen waaraan de buizen in de praktijk zijn onderworpen, een zeer onregelmatige gedaante vertoont. De oorzaak hiervan is dat het chassis, de kast en andere onderdelen waarmede elektrische apparaten worden samengesteld, voor mechanische en akoestische trillingen vele resonantiefrequenties vertonen, waardoor het geheel zich voordoet als bestaande uit een groot aantal met elkaar gekoppelde resonatoren. *Fig. 1* toont een voorbeeld van een frequentiespectrum van de versnelling waaraan een buis in een televisieontvanger is onderworpen wanneer aan de luidspreker een constant elektrisch vermogen van 50 mW wordt toegevoerd met een variabele frequentie. Voor de meting van een dergelijk frequentiespectrum vervangt men de buis door een trillingsopnemer, die is geplaatst in een kastje dat in afmetingen en gewicht ongeveer met de buis overeenkomt. Gebruikt men drie opnemers die in loodrecht op elkaar staande richtingen zijn aangebracht, dan kan men ook de richting bepalen waarin de versnellingen optreden. *Fig. 2* toont een dergelijke combinatie van drie trillingsopnemers. Het geheel wordt ongeveer even zwaar gemaakt als een buis en kan in plaats van een buis in één der buishouders van het betrokken apparaat worden gestoken.

Fig. 2. Combinatie van drie trillingsopnemers, die wordt gebruikt voor het meten van de trillingen waaraan buizen in elektronische apparaten zijn onderworpen. Het geheel kan in plaats van een buis in een buishouder worden gestoken.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Methodes van onderzoek van microfonie

Enkele direct bij de praktijk aansluitende onderzoekmethodes voor microfonie liggen tamelijk voor de hand en zijn ook vrij gemakkelijk uitvoerbaar. Zo kan men de neiging tot microfonie van een laagfrequentieversterkbuis nagaan door deze buis in een versterkschakeling op te nemen. De uitgangsspanning wordt via een regelbare versterker aan een luidspreker toegevoerd, die in de nabijheid van de te onderzoeken buis is opgesteld. In *fig. 3* is deze schakeling schematisch weergegeven. Hierin is *B* de te onderzoeken buis, *L* de luidspreker en *A* de genoemde versterker. De versterking van *A* wordt nu zodanig ingesteld dat juist rondzingen optreedt. Vervolgens kan men vaststellen hoe groot bij deze instelling de „gevoeligheid" van de combinatie van

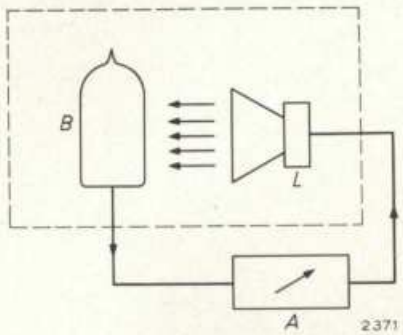


Fig. 3. Principe van een eenvoudige opstelling voor het onderzoek van een laagfrequentieversterkbuis op microfonie. *B* te onderzoeken buis, *L* luidspreker, *A* regelbare versterker.

B en *A* is. Hieronder verstaat men meestal de wisselspanning die aan het stuurrooster van *B* nodig is om *A* een uitgangsvermogen van 50 mW te doen leveren. De op deze wijze bepaalde instelling van de versterking van *A* is dus bij aansluiting op de buis *B* ontoelaatbaar, en men kan aan de gebruikers van dit buistype een nog wèl toelaatbare instelling (gevoeligheid van de combinatie) opgeven.

Het behoeft geen betoog dat een dergelijke opgave eigenlijk slechts waarde heeft voor een opstelling die nauwkeurig overeenkomt met die waarmee de experimenten werden uitgevoerd. Een kleine wijziging in de constructie van het toestel waarin de buis wordt gebruikt, kan de neiging tot microfonie sterk beïnvloeden. Hierom, en mede om de reeds genoemde spreiding tussen de exemplaren van een buistype, moet steeds een ruime veiligheidsmarge in acht worden genomen.

Een hoogfrequentiebuis kan op een overeenkomstige manier worden onderzocht. Men neemt dan de te onderzoeken buis op in een hoogfrequentieversterktrap en voert aan het rooster een ongemoduleerde hoogfrequente signaalspanning toe (zie *fig. 4*). Op de uitgangszijde van deze versterktrap wordt een detector aangesloten, waarop weer een regelbare laagfrequentieversterker met luidspreker

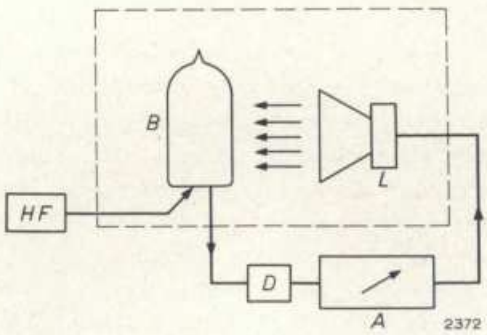


Fig. 4. Principe van een opstelling voor het onderzoek van een hoogfrequentieversterkbuis op microfonie. *B* te onderzoeken buis, *L* luidspreker, *A* regelbare versterker, *D* detector, *HF* signaalgenerator.

volgt. Door microfonie ontstaat nu modulatie van de hoogfrequente spanning, en de detector zal een laagfrequent signaal leveren, dat via de laagfrequentieversterker en de luidspreker rondzingen kan veroorzaken.

Op de beschreven wijzen kan men verschillende buistypen of verschillende exemplaren van één type onderling vergelijken. Ook kan men nagaan of bepaalde wijzigingen die men in een buis aanbrengt om een vermindering van de microfonie te verkrijgen, al dan niet resultaat opleveren. Het is echter onmogelijk om op deze wijze te weten te komen welke onderdelen van een buis de oorzaak zijn van de microfonie; men krijgt dus geen aanwijzingen voor het aanbrengen van de juiste verbetering.

Meer mogelijkheden worden in dit opzicht verkregen wanneer men de opstelling niet laat rondzingen, doch de luidspreker aansluit op een toongenerator met versterker en de uitgangsspanning van de te onderzoeken buis meet, b.v. met behulp van een versterker en een buisvoltmeter (*fig. 5*).

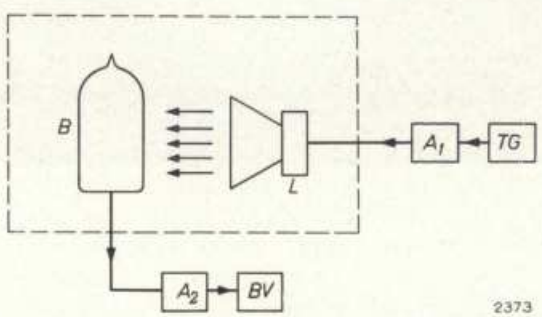


Fig. 5. Principe van een opstelling voor het onderzoek van elektronenbuizen op microfonie. De luidspreker *L* wordt via de versterker A_1 gevoed uit de toongenerator *TG*. De signaalspanning die in de buis *B* door microfonie wordt opgewekt, wordt via de versterker A_2 toegevoerd aan de buisvoltmeter *BV*.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Men heeft hierbij nl. de mogelijkheid om de frequentie van de trillingen waaraan de buis is onderworpen, te kiezen en te variëren. De sterkte van de microfonie blijkt dan als functie van de frequentie een zeer grillig verloop te hebben. Ten dele is dit te wijten aan het feit dat de onderdelen van het elektrodesysteem verschillende resonantiefrequenties voor mechanische trillingen hebben en de buis zich gedraagt als bestaande uit een groot aantal met elkaar gekoppelde resonatoren. Hierbij komt echter nog het hierboven reeds genoemde en in fig. 1 geïllustreerde feit dat ook bij een constant luidsprekervermogen, de versnelling waaraan de buis is onderworpen een grillig spectrum vertoont. Het bestuderen van de microfonie-eigenschappen van elektronenbuizen is hierdoor ook met een opstelling volgens fig. 5 moeilijk: men moet er steeds op bedacht zijn dat de oorzaak van een bij een bepaalde frequentie optredende sterke microfonie misschien buiten de buis is gelegen.

Om tot resultaten te komen die alleen door de buis zijn bepaald, moet men de buis direct in trilling brengen, en niet via een luidspreker, een kast en een chassis.

Men kan dit bereiken door de buis te onderwerpen aan stoten van een bepaalde sterkte en de signaalspanning te meten die hierbij door microfonie ontstaat. In *fig. 6* is een hiervoor geconstrueerd apparaat afgebeeld. Ook hiermede zijn echter

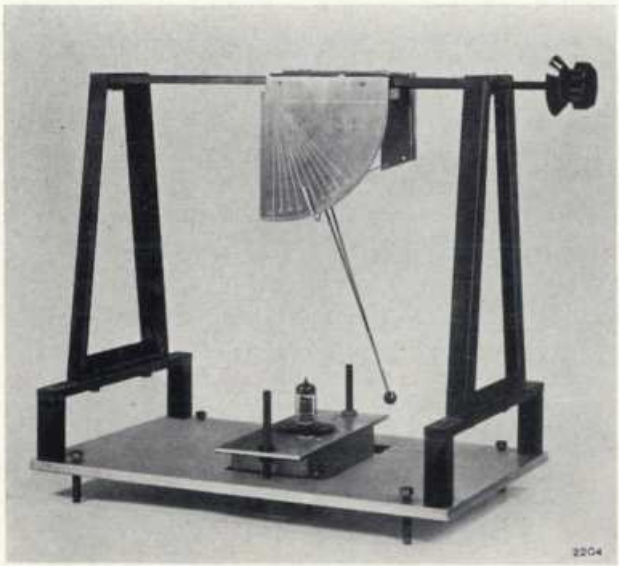


Fig. 6. Apparaat voor het onderzoek van de microfonie-eigenschappen van elektronenbuizen door middel van stoten.

weinig bevredigende resultaten verkregen. Door een stoot brengt men alle onderdelen van de buis gelijktijdig in trilling en men kan als opgewekte signaalspanning uitsluitend het totale resultaat meten. Hierdoor is ook deze methode eigenlijk alleen te gebruiken voor het onderling vergelijken van buizen, en niet voor het opsporen van de oorzaken van microfonie.

Een grondige studie van de microfonie-eigenschappen van buizen is alleen mogelijk als men deze onderwerpt aan trillingen met een constante versnelling en een variabele frequentie. Alleen in dit geval is het mogelijk uit het optreden van een sterke microfonie bij een bepaalde frequentie conclusies te trekken, of althans vermoedens uit te spreken, over de oorzaak.

Men heeft om deze gedachte te realiseren de constante versnelling tot stand gebracht door de buizen te bevestigen aan een speciaal hiervoor geconstrueerde triller. Deze methode is sinds enige tijd in verschillende Philipslaboratoria op talrijke buistypen toegepast en zal nu nader worden beschreven.

Een triller voor microfonieonderzoek

In *fig. 7* is een axiale doorsnede weergegeven van een triller die is geconstrueerd voor het onder-

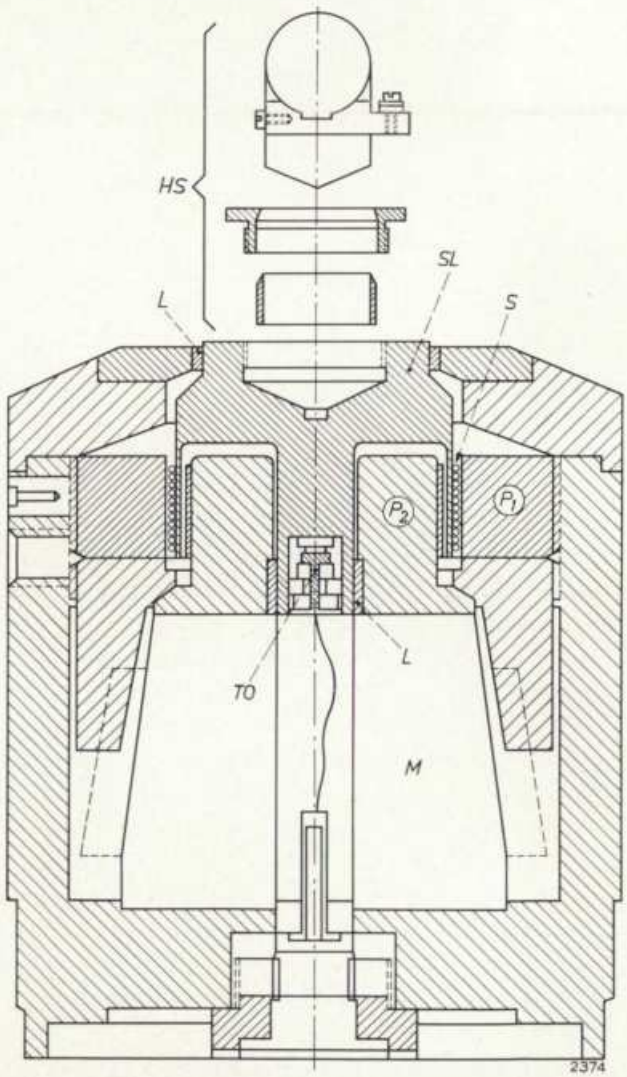
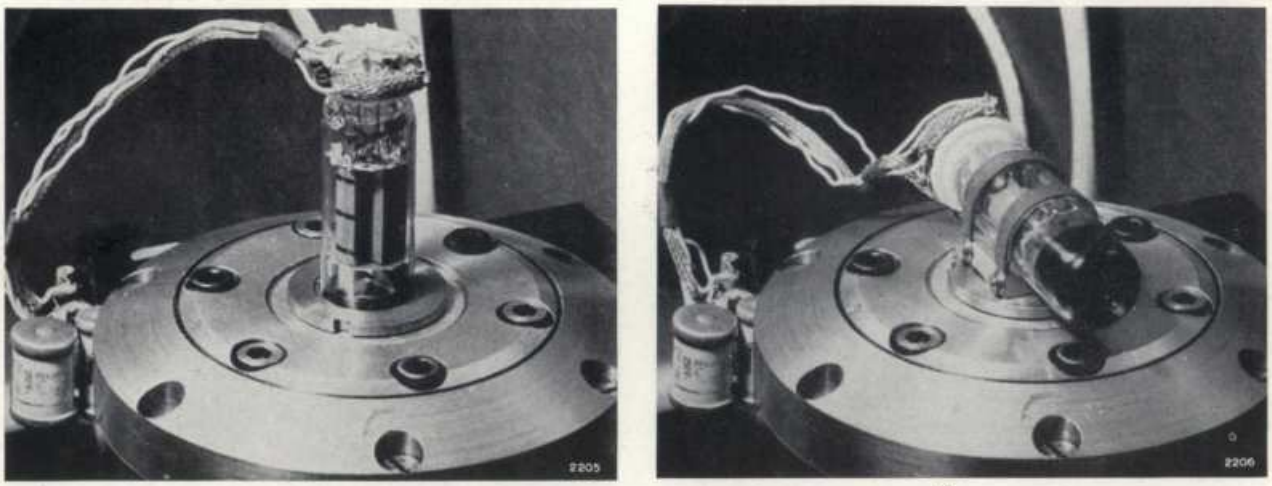


Fig. 7. Doorsnede van een triller voor onderzoek van microfonie van elektronenbuizen. *S* spoel, *SL* spoellichaam, *L* glijlegers, *M* magneet, P_1 en P_2 poolschoenen, *TO* trillingsopnemer, *HS* hulpstukken ter bevestiging van de te onderzoeken buis op het spoellichaam.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023



a *b*

Fig. 8. Bovenste gedeelte van de triller met de te onderzoeken buis, die wordt onderworpen aan trillingen in de lengterichting (*a*) of in een dwarsrichting (*b*).

zoek van microfonie in elektronenbuizen. De constructie van de triller gelijkt veel op die van een elektrodynamische luidspreker. Het apparaat bestaat nl. in hoofdzaak uit een spoel die kan bewegen in de luchtspleet van een ringvormige magneet. Deze spoel is gewikkeld op een aluminium spoelkoker, die in glijlegers rust. De resonantiefrequentie van dit geheel ligt ongeveer bij 30 kHz, wat aanzienlijk hoger is dan de hoogste frequentie van het gebied waarin de microfonieonderzoekingen gewoonlijk plaatsvinden (ongeveer 0 tot 15 kHz). Hierdoor wordt in dit frequentiegebied bij een constante wisselstroom in de spoel een nagenoeg constante amplitude van de wisselende versnelling verkregen. (Voor een versnellingsamplitude van 1 *g* was een wisselstroom van 100 mA nodig.) Dit kan vrij eenvoudig worden gecontroleerd door op korte afstand van het bovenvlak van het spoellichaam een stilstaand metalen plaatje op te stellen en de variaties te meten die optreden in de capaciteit tussen dit plaatje en het spoellichaam. Deze capaciteit is immers omgekeerd evenredig met de afstand. Bij een constante lading van de aldus gevormde condensator treden hieraan spanningsvariaties op, waarvan de grootte evenredig is met de uitwijking van de triller. Deze spanningsvariaties kunnen, na versterking, worden gemeten. Zoals uit de theorie van de harmonische trilling volgt, moet, indien de amplitude van de versnelling constant is, de maximale uitwijking omgekeerd evenredig zijn met het kwadraat van de frequentie, dus bij toenemende frequentie per octaaf een factor 4 afnemen. Dit bleek bij de hier beschreven triller in het gewenste frequentiegebied inderdaad het geval te zijn.

Bijzondere zorg dient te worden besteed aan de manier waarop de te onderzoeken buis aan het apparaat wordt bevestigd. Deze bevestiging zou volkomen star, dus niet verend, moeten zijn, omdat anders de trillingen van het spoellichaam niet onafhankelijk van de frequentie aan de buis worden doorgegeven. Nu is enige vering bij de bevestiging van de buis niet te vermijden, en hierdoor vertoont de buis met de bevestigingsmiddelen een resonantie. Om hiervan bij de metingen geen hinder te ondervinden, is het noodzakelijk de constructie zodanig uit te voeren dat de desbetreffende resonantiefrequentie ook weer boven het te onderzoeken frequentiegebied ligt. Enige onderdelen waarmede dit is gelukt, zijn in het bovenste gedeelte van fig. 7 getekend.

Om een voortdurende controle op de trillingen mogelijk te maken, is een trillingsopnemer van het piëzo-elektrische type (met een piëzo-element van bariumtitanaat) aangebracht; in fig. 7 is deze met *TO* aangegeven. Hiermede kan dus tevens worden gecontroleerd of door een eventueel te slappe bevestiging van de te onderzoeken buis een storende resonantie ontstaat.

Fig. 8 toont een tweetal foto's van het bovenste deel van de triller, waarop een buis in twee verschillende standen is bevestigd, zodat deze zowel in de lengte- als in de dwarsrichting aan trillingen kan worden onderworpen.

Metingen met de triller

Met een triller zoals hierboven is beschreven, kan een buis aan een bekende versnelling worden onderworpen die, anders dan bij de in fig. 3, 4 en 5 geïllustreerde meetmethodes, onafhankelijk is van

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

toevallige resonantiefrequenties van andere delen van de apparatuur. Wanneer nu bij een bepaalde frequentie een bijzonder sterke microfonie optreedt, is deze te wijten aan het feit dat de frequentie waarmede de buis in trilling wordt gebracht, gelijk is aan de resonantiefrequentie van één der onderdelen van de buis. Het opsporen van deze frequenties kan geschieden doordat men de buis door middel van soepele aansluitdraden in een versterkschakeling opneemt en de signaalspanning meet die door microfonie in de schakeling ontstaat terwijl de trilfrequentie langzaam wordt gevarieerd. Hiertoe kan met voordeel gebruik worden gemaakt van een registrerende meter. Van aldus verkregen spectrogrammen tonen de figuren 21 t/m 24 enige voorbeelden.

Bij deze en soortgelijke metingen dient de trillingsfrequentie langzaam en zeer gelijkmatig te worden gevarieerd. De mechanische trillingen die de verschillende onderdelen kunnen uitvoeren, zijn nl. zeer weinig gedempt. Hierdoor kunnen zij slechts in een zeer beperkt frequentiegebied worden opgewekt; vele pieken in het spectrogram zijn zo scherp dat zij gemakkelijk over het hoofd kunnen worden gezien.

Heeft men eenmaal vastgesteld dat bij een bepaalde frequentie een sterk microfonisch effect optreedt, dan is men voor de taak gesteld het onderdeel op te sporen dat hiervan de oorzaak is. Hiertoe kan men op verschillende manieren te werk gaan. Een voor de hand liggende manier bestaat in het berekenen van de resonantiefrequenties van onderdelen waarvan men op grond van theoretische overwegingen kan verwachten dat zeer kleine bewegingen een grote invloed op de elektrische eigenschappen van de buis hebben. Men kan dan nagaan of één dezer frequenties samenvalt met een piek in het spectrogram. Is dit het geval, dan kan men vermoeden dat het desbetreffende onderdeel de oorzaak is van het ontstaan van deze piek. Verdere experimenten moeten dan de juistheid of onjuistheid van dit vermoeden aantonen.

Deze methode van onderzoek werkt in de praktijk zeer onbevredigend. De belangrijkste oorzaak hiervan is wel dat de berekening van de resonantiefrequenties van de onderdelen van een elektrodesysteem in de meeste gevallen slechts met een vrij grove benadering mogelijk is. Enerzijds zijn nl. alleen voor eenvoudige configuraties exacte formules af te leiden, die in praktische gevallen slechts met benaderingen en correcties kunnen worden toegepast, anderzijds is het meestal niet nauwkeurig bekend op welke wijze de elektrodes zijn ingeklemd of gesteund worden en of zij al dan niet enige speling hebben.

Wij zullen dit laatste illustreren aan de hand van een voorbeeld, en wel van een rooster. De normale constructie hiervan is in *fig. 9* geschetst. Het rooster bestaat uit twee roosterstaven, S_1 en S_2, die in gaten van de micaschijven M_1 en M_2 zijn geplaatst. De roosterdraden D zijn als een schroeflijn om de

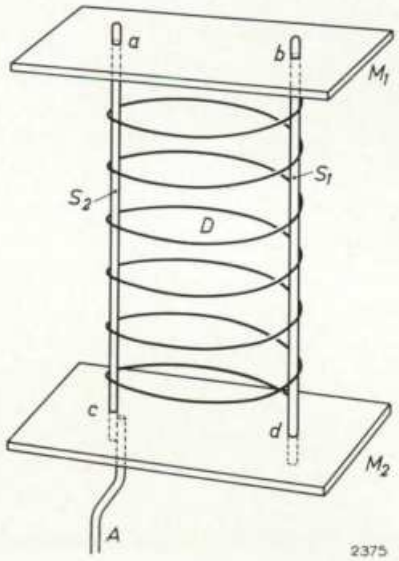


Fig. 9. Vereenvoudigde voorstelling van de constructie van een rooster. S_1 en S_2 roosterstaven, D roosterdraden, M_1 en M_2 micaschijven, die op de plaatsen a, b, c en d het rooster steunen, A aansluitdraad.

staven gewikkeld. Beschouwt men nu S_1 en S_2 als vrij trillende staven, dan kan hun resonantiefrequentie f_r voor mechanische trillingen worden berekend met behulp van een uit de mechanica bekende formule:

$$f_r = \frac{d}{4l^2}\sqrt{\frac{E}{\varrho}}\,K.$$

Hierin is d de diameter en l de lengte van de roosterstaaf. Verder is E de elasticiteitsmodulus en ϱ de dichtheid van het materiaal, terwijl K een constante is, die afhangt van de wijze waarop de staaf is ingeklemd of gesteund. De grootte dezer constante is:

$K = 0{,}56$ indien de trillende staaf aan één einde ingeklemd en aan het andere einde vrij is,

$K = 3{,}56$ indien de staaf aan beide einden is ingeklemd,

$K = 2{,}45$ indien de staaf aan één einde is ingeklemd en aan het andere einde tegen een steun rust,

$K = 1{,}56$ indien de staaf aan beide einden tegen steunen rust.

Door de onvermijdelijke spreiding in de afmetingen van de roosterstaven en van de gaten in de micasteunen is het nooit zeker of men de staven ter plaatse a, b, c en d als ingeklemd, gesteund of vrij moet beschouwen. Uiterst kleine verschillen in afmetingen, die op de elektrische eigenschappen van de buis geen merkbare invloed hebben, kunnen wegens de verschillen in K de resonantiefrequentie van de roosterstaven sterk beïnvloeden. Verder geeft ook de aanwezigheid van de roosterdraden D een onnauwkeurigheid in de berekening. Men kan hun invloed in rekening brengen als een vergroting van de soortelijke massa van de roosterstaven, doch dit is uiteraard ook slechts een benadering. Ten slotte kan ook het feit dat aan één der roosterstaven een aansluitdraad A is bevestigd, slechts met een benaderingsmethode in rekening worden gebracht.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Voor de roosterdraden zijn een tweetal empirisch gevonden formules bekend [3]), die gelden voor draden, gebogen volgens een cirkelboog (*fig. 10a*) en volgens een rechthoek (fig. 10*b*). Deze formules luiden voor een roosterdraad volgens fig. 10*a*:

$$f_r = \frac{0{,}217\ d}{2{,}78\ a^2 + 0{,}558\ R^2},$$

en voor een draad volgens fig. 10*b*:

$$f_r = \frac{0{,}217\ d}{2{,}9\ a^2 + 0{,}325\ R^2}.$$

Deze formules zijn alleen geldig wanneer a en R ongeveer even groot zijn ($R/a < 2$). Hierdoor, en bovendien door het feit dat de werkelijke vorm van de roosterdraden nooit nauwkeurig aan fig. 10*a* of *b* voldoet, is ook hier het resultaat van de berekening slechts een benadering van de werkelijkheid.

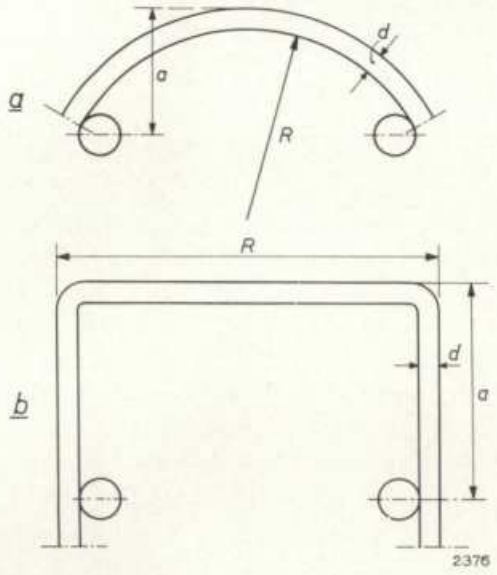


Fig. 10. *a*) Cirkelvormig gebogen roosterdraad, *b*) rechthoekig gebogen roosterdraad.

Een andere bron van onzekerheid is het feit dat de vele onderdelen die in een elektrodesysteem mechanische trillingen kunnen uitvoeren, met elkaar zijn gekoppeld, waardoor resonantiefrequenties ontstaan die niet overeenkomen met de resonantiefrequenties van de desbetreffende onderdelen afzonderlijk.

Stroboscopisch onderzoek

De enige methode om met zekerheid één der onderdelen van een buis te kunnen aanwijzen als de oorzaak van een bij een bepaalde frequentie optredende sterke microfonie, is de directe waarneming van het feit dat dit onderdeel bij die frequentie in resonantie is, dus trilt met een grote amplitude. Daar deze „grote" amplitude in de meeste gevallen voor het blote oog nog niet of nauwelijks waarneembaar is, moet de waarneming door middel van een microscoop geschieden. Verder kan het noodzakelijk zijn de mogelijkheid tot het waarnemen van roosters e.d. te scheppen door voor dit onderzoek enkele buizen te vervaardigen waarbij in de anode of in de afscherming openingen zijn aangebracht.

De frequenties waarbij de onderzoekingen plaatshebben, zijn in de regel zo hoog dat de traagheid van het oog de directe waarneming van de beweging verhindert. Men kan echter de bewegingen zichtbaar maken indien men de onderzochte buis door middel van een stroboscoop belicht. De triller en de stroboscoop moeten dan worden gevoed door twee toongeneratoren die wisselspanningen leveren waarvan de frequenties enkele Hz verschillen. Een meetopstelling voor het beschreven doel is schematisch in *fig. 11* weergegeven. Wordt de buis in trilling gebracht, dan ziet men in de microscoop de beschouwde onderdelen bewegen met een frequentie die gelijk is aan het verschil van de trillingsfrequentie en de belichtingsfrequentie. Het feit dat één der delen in resonantie is met de trillingsfrequentie, komt, behalve in de amplitude, tot uiting in de faze.

Wanneer een trillend systeem wordt aangedreven door een kracht waarvan de frequentie veel lager is dan de resonantiefrequentie van het systeem, is de uitwijking in faze met de kracht. Is de frequentie van de kracht veel hoger dan de resonantiefrequentie, dan zijn de uitwijking en de kracht in tegenfaze. De overgang tussen deze beide toestanden vindt plaats in een frequentiegebied rondom de resonantiefrequentie, dat smaller is naarmate de trillingen van het systeem minder gedempt zijn. Bij de resonantiefrequentie zelf is de fazeverschuiving tussen kracht en uitwijking 90°.

Om bij alle frequenties automatisch een verschil van enkele Hz tussen de beide toongeneratoren te krijgen, zou men de frequentie-instelmechanismes met elkaar kunnen koppelen. Het is echter zeer moeilijk om een dergelijke koppeling zodanig uit

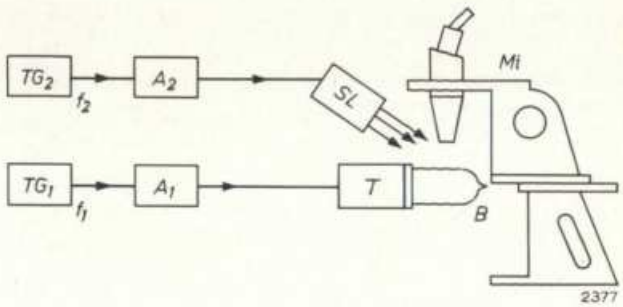


Fig. 11. Principeschema van een opstelling voor stroboscopisch onderzoek van buizen op microfonie. TG_1 en TG_2 toongeneratoren, A_1 en A_2 versterkers, T triller, B te onderzoeken buis, SL stroboscooplamp, Mi microscoop.

[3]) Zie P. M. Handley en P. Welch, Valve noise produced by electrode movement, Proc. Inst. Rad. Engrs. **42**, 565-573, 1954.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

te voeren dat in het gehele in aanmerking komende frequentiegebied het frequentieverschil voldoende klein is. Is dit verschil te groot, dan kan het oog de afzonderlijke trillingen niet meer volgen. Wordt dan één der onderdelen in zijn resonantiefrequentie aangestoten, dan is dit vrijwel niet waarneembaar.

Een verbetering van de waarnemingsmogelijkheden wordt verkregen als men de stroboscoopfrequentie nauwkeurig gelijk maakt aan de trillingsfrequentie, door de triller en de stroboscoop op een gemeenschappelijke toongenerator aan te sluiten. Men ziet dan uiteraard de trillende delen stilstaan, en deze stilstand treedt bij alle frequenties op. Wanneer men echter de frequentie langzaam varieert en hierbij de resonantiefrequentie van een zich in het gezichtsveld van de microscoop bevindend onderdeel passeert, is waar te nemen dat in de trillingen die dit deel uitvoert, de hierboven reeds vermelde fazesprong van 180° optreedt. Men ziet dan dat dit onderdeel tijdens het passeren van een zeer klein frequentiegebied één volledige trilling uitvoert en daarna weer in rust blijft. De grote oplettendheid die wordt vereist om dit verschijnsel waar te nemen, is evenwel een ernstige belemmering voor de toepassing van deze methode bij onderzoekingen op grote schaal. Ook aan de apparaten worden hoge eisen gesteld: de frequentie moet uiterst langzaam en continu worden gevarieerd.

De stroboscopische methode van onderzoek is pas een succes geworden nadat een apparatuur was geconstrueerd waarmede het in het gehele te onderzoeken frequentiegebied mogelijk was tussen de trillingsfrequentie en de frequentie van de stroboscopische belichting een constant frequentieverschil van 1 à 2 Hz te handhaven. In *fig. 12* is een principeschema van een hiertoe geconstrueerde opstelling weergegeven. Evenals bij fig. 11 wordt de triller aangedreven door de toongenerator *TG* via de versterker A_1. De spanning van de toongenerator wordt eveneens gebruikt voor de stroboscooplamp, doch hiervoor eerst toegevoerd aan een frequentieverschuiver *FS*, die een uitgangsspanning levert waarvan de frequentie een constant bedrag hoger of lager is dan de frequentie van de toegevoerde spanning. De uitgangsspanning van de frequentieverschuiver wordt gebruikt als stuurspanning voor de impulsgenerator *PG*, die kortdurende spanningsimpulsen levert aan de stroboscooplamp *SL*.

De frequentieverschuiver bestaat uit een roterend en een stilstaand gedeelte. De stator is voorzien van een driefazenwikkeling. Uit de spanning van de toongenerator (frequentie f) wordt in een speciale versterker een driefazenspanning afgeleid, die aan de stator wordt toegevoerd. Hierdoor ontstaat een draaiveld, dat in de eenfazewikkeling van de rotor een wisselspanning induceert. Staat de rotor stil, dan is de frequentie van deze laatstgenoemde spanning gelijk aan f, doch wordt de rotor rondgedraaid met een snelheid van Δf omwentelingen per seconde, dan heeft de in de rotorwikkeling opgewekte spanning een frequentie die, afhankelijk van de draairichting, een bedrag Δf hoger of lager is dan f. Wordt nu de rotor met een constante snelheid rondgedraaid, dan wordt dus tussen de toegevoerde spanning en de uitgangsspanning een constant frequentieverschil gehandhaafd.

De te onderzoeken buis *B* is opgenomen in een versterkschakeling A_3, waarvan de uitgangsspanning aan de oscilloscoop *O* wordt toegevoerd. Aan het andere platenpaar van de oscilloscoopbuis wordt een spanning aangesloten die evenredig is met de stroom waarmede de triller wordt aangedreven. Door het gelijktijdig waarnemen van het beeld in de microscoop en dat op het oscilloscoopscherm kan men nu met grote zekerheid vaststellen of de trillingen van een bepaald onderdeel de oorzaak zijn van een bij een bepaalde frequentie optredende sterke microfonie. Men ziet dan namelijk bij deze frequentie de amplitude van de trillingen die dit onderdeel uitvoert een maximum vertonen, en gelijktijdig ziet men op de oscilloscoop de door microfonie opgewekte wisselspanning een maximale waarde bereiken. Bovendien ziet men tijdens het passeren van de resonantiefrequentie de hierboven reeds aangeduide fazesprong optreden. Deze fazesprong treedt namelijk ook op tussen de stroom die aan de

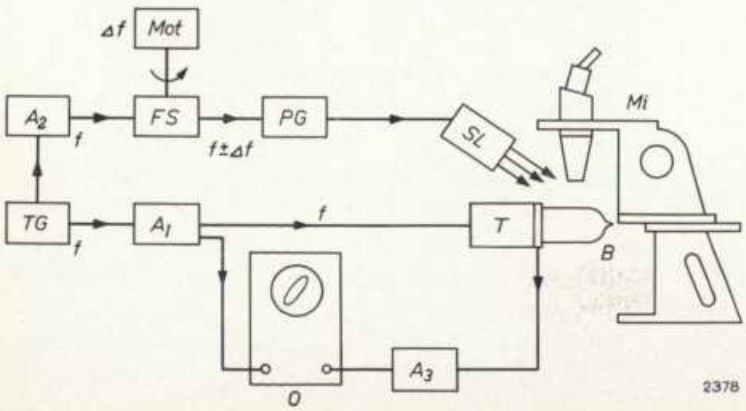


Fig. 12. Principeschema van een opstelling voor stroboscopisch onderzoek van buizen op microfonie. Door middel van de frequentieverschuiver *FS* wordt een constant frequentieverschil van 1 à 2 Hz gehandhaafd tussen de trillingsfrequentie en de frequentie van de stroboscopische belichting. *TG* toongenerator, A_1, A_2 en A_3 versterkers, *Mot* motor, *PG* impulsgenerator, *SL* stroboscooplamp, *Mi* microscoop, *T* triller, *B* te onderzoeken buis, *O* oscilloscoop.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

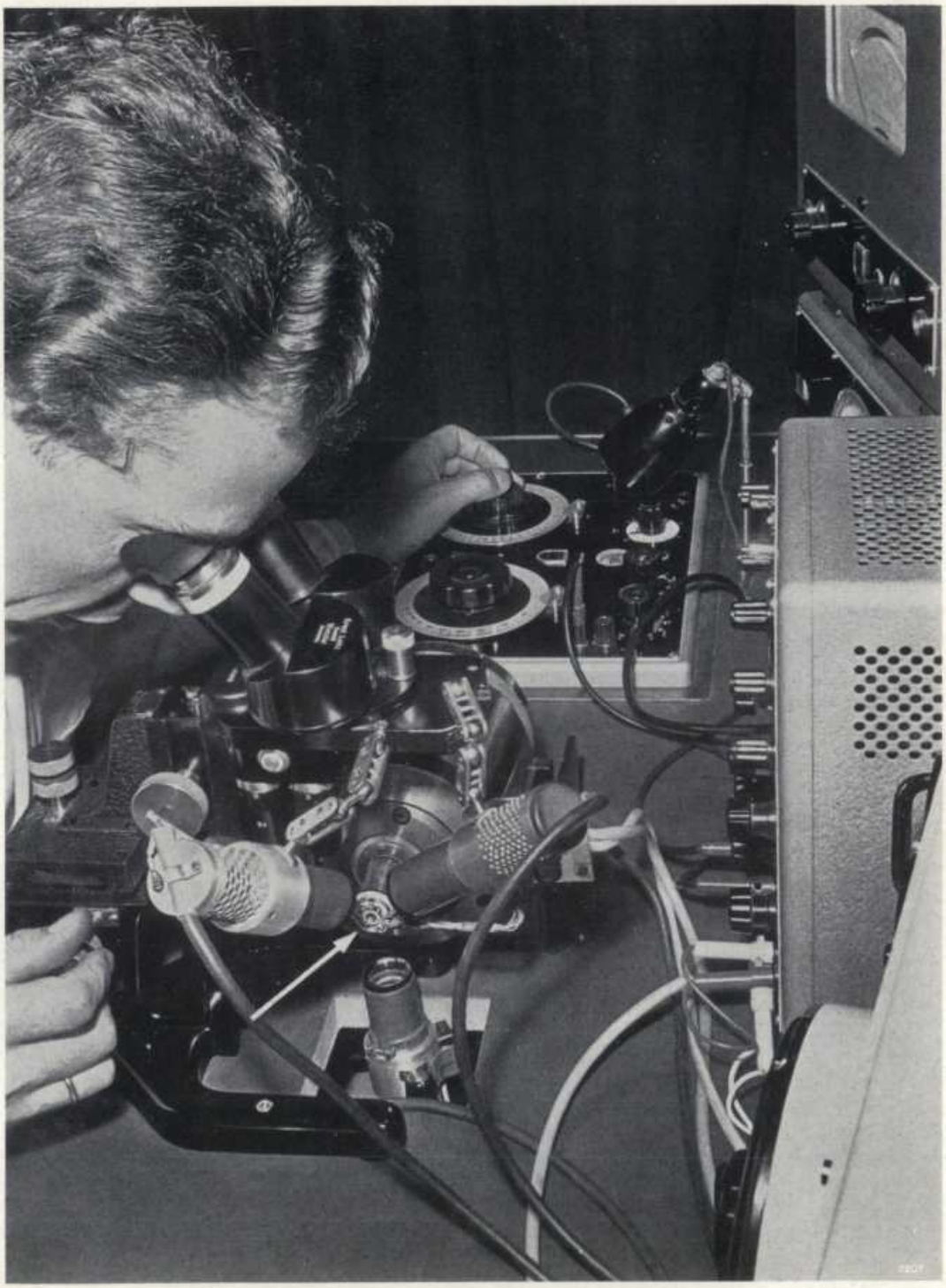


Fig. 13. Onderzoek van een buis op zijn microfonie-eigenschappen. De pijl wijst naar de in onderzoek zijnde buis.

triller wordt toegevoerd en de door microfonie opgewekte spanning, en is dus op de oscilloscoop in een lissajousfiguur zichtbaar.

Door de uiterst geringe demping van de trillingen treden de hier beschreven verschijnselen op in een zo klein frequentiegebied dat het tegelijk in resonantie komen van twee of meer onderdelen, zelfs indien de resonantiefrequenties zeer dicht bij elkaar liggen, vrijwel is uitgesloten.

Fig. 13 toont een foto van een opstelling zoals hier is beschreven. De waarnemer varieert met zijn linkerhand de frequentie van de toongenerator, terwijl hij met zijn rechterhand de microscoop en de stroboscooplamp richt op het te beschouwen onderdeel. Over de rand van het oculair kan hij het beeldscherm van de rechts zichtbare oscilloscoop waarnemen.

De hier beschreven opstelling kan nog op een andere wijze worden gebruikt. Men voert dan aan

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

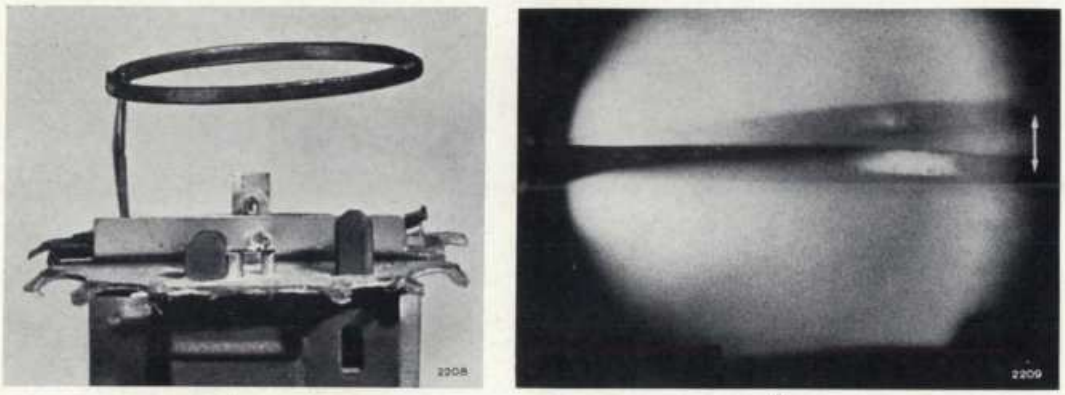
de triller niet de versterkte spanning van een toongenerator toe, maar de, eveneens versterkte, wisselspanning die in de te onderzoeken buis door microfonie ontstaat. In vele gevallen zal nu oscilleren optreden, en wel met een frequentie die overeenkomt met de resonantiefrequentie van één der onderdelen. Dit onderdeel zal dan met een grote amplitude trillen en het is in de meeste gevallen niet moeilijk om met de microscoop bij de stroboscopische belichting vast te stellen welk onderdeel dit is. Met deze methode kan uiteraard alleen dat onderdeel worden opgespoord dat de voornaamste bijdrage tot de microfonie levert, doordat bij de resonantiefrequentie van dit onderdeel oscilleren optreedt. Het is echter ook mogelijk de oorzaak van sterke microfonieverschijnselen bij andere frequenties op deze wijze te vinden, nl. door in de terugkoppelweg een filter op te nemen dat alleen signalen in een beperkt frequentiegebied doorlaat. In dit geval kan alleen oscilleren bij een in dit gebied gelegen frequentie optreden, en het onderdeel dat hiervan de oorzaak is, kan met de microscoop worden opgezocht.

Voor de onderzoekingsmethode met een oscillerende schakeling is het nog meer dan bij de hiervóór besproken methodes van belang dat de triller met de eraan bevestigde buis in het onderzochte frequentiegebied geen resonantiefrequentie heeft. Inmers, was dit wel het geval, dan zou de schakeling op deze frequentie kunnen gaan oscilleren, en het zoeken naar het „schuldige" onderdeel zou dan geen resultaat opleveren.

Voorbeelden van microfonie

Het is helaas niet mogelijk door foto's een duidelijke weergave te verkrijgen van het beeld dat in de microscoop wordt waargenomen wanneer een onderdeel met zijn resonantiefrequentie in trilling wordt gebracht. Om toch een indruk te geven van het trillende onderdeel, zijn hier enige foto's gereproduceerd die zijn verkregen door dubbele belichting, nl. in de uiterste standen van de trilling. Het is immers met een opstelling volgens fig. 12 en 13 op eenvoudige wijze mogelijk het beeld van het onderdeel dat men trillingen ziet uitvoeren, in iedere gewenste stand stil te laten staan. Hiertoe behoeft men slechts de motor die de rotor van de frequentieverschuiver ronddraait, stil te zetten. Het beeld blijft dan uiteraard ook stilstaan, en door met de hand de rotor te draaien, kan men deze stilstand in iedere fazepositie doen plaatsvinden.

De figuren 14 t/m 20 tonen enkele onderdelen van elektronenbuizen en het beeld dat in de microscoop zichtbaar is als de buis met de resonantiefrequentie van het respectieve onderdeel in trilling wordt gebracht. De pijlen geven steeds de richting van de trillingen aan.



a *b*

Fig. 14. *a*) Getter van een elektronenbuis.
b) Beeld dat in de microscoop zichtbaar is als de buis in trilling wordt gebracht met de resonantiefrequentie van de getter (300 Hz).

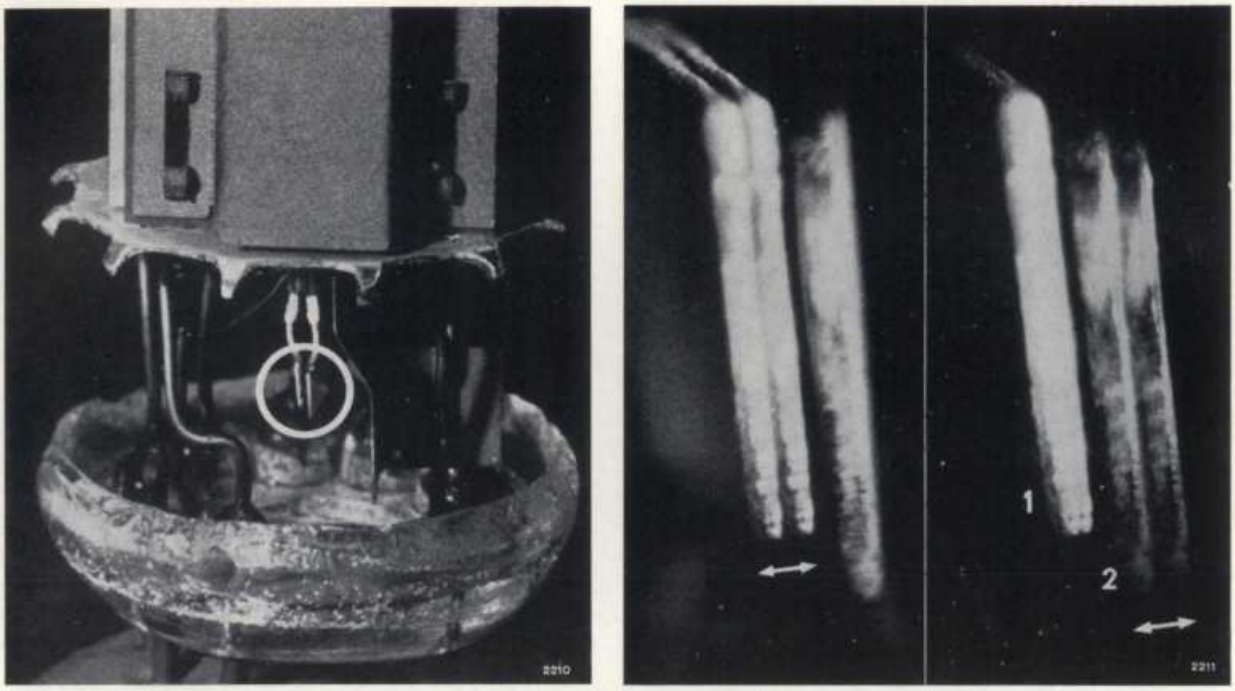
Fig. 14 toont een getter, die door zijn grote afmetingen en door het feit dat hij slechts aan één zijde wordt gesteund, een lage resonantiefrequentie heeft, nl. 300 Hz. Het is begrijpelijk dat een dergelijk groot onderdeel, ook al behoort het niet tot het eigenlijke elektrodesysteem, als het in trilling geraakt, een merkbare invloed moet hebben op de werking van de buis.

Fig. 15 toont de beide aansluitdraden van de gloeidraad, die verschillende resonantiefrequenties hebben, nl. 570 en 600 Hz. In fig. 15*b* en *c* ziet men de beelden in de microscoop wanneer de buis met één van deze frequenties in trilling wordt gebracht. Men ziet dat telkens één der beide draden vrijwel in rust blijft en de andere trilt.

Fig. 16 laat een keerrooster van een pentode zien, dat door een gat in de anode kon worden waarge-

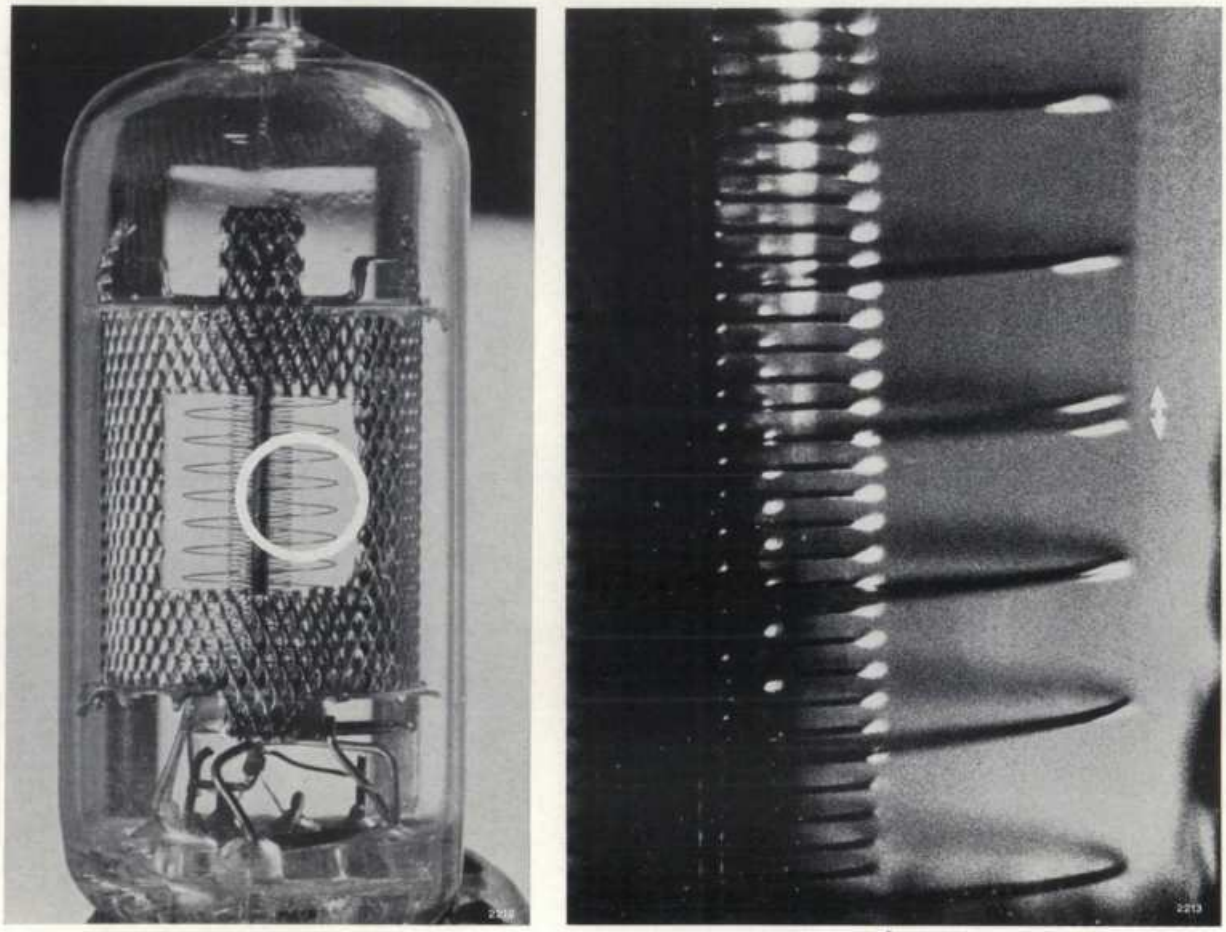
Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023



a *b* *c*

Fig. 15. *a*) Onderste deel van het elektrodesysteem van een elektronenbuis. In de cirkel de gloeidraaduiteinden, waarvan *b*) en *c*) de beelden in de microscoop tonen voor het geval dat de buis achtereenvolgens in trilling wordt gebracht met de resonantiefrequenties van deze beide uiteinden (570 en 600 Hz).



a *b*

Fig. 16. *a*) Keerrooster van een pentode, zichtbaar door een gat in de anode. In de cirkel het gedeelte waarvan *b*) het beeld in de microscoop toont, wanneer de buis met de resonantiefrequentie van één der roosterdraden (2100 Hz) in trilling wordt gebracht.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

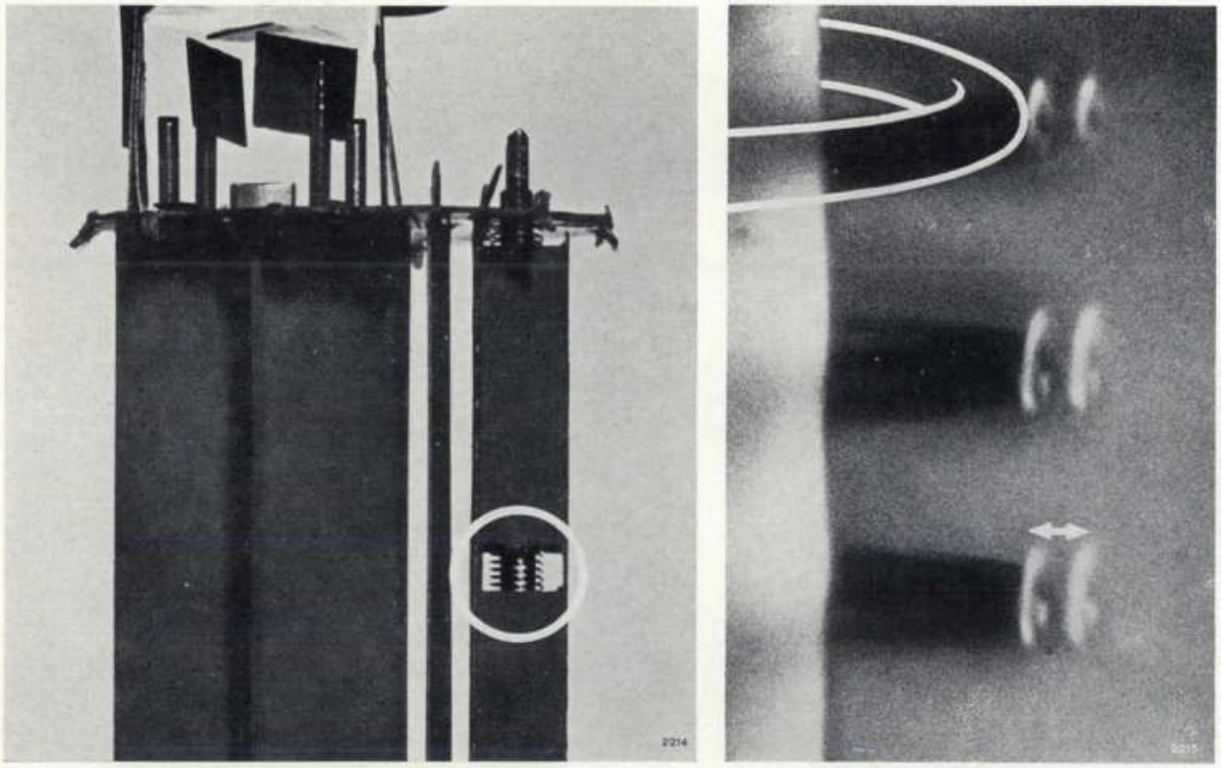
www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

nomen. Hoewel de resonantiefrequenties van de windingen onderling slechts weinig verschillen, is in fig. 16*b* toch duidelijk zichtbaar dat bij de resonantiefrequentie van één hiervan (ongeveer 2100 Hz) alleen deze winding in trilling geraakt. Dit illustreert het feit dat de mechanische trillingen zeer weinig zijn gedempt.

Trillingen van roosterwindingen kunnen een ontoelaatbare microfonie veroorzaken wanneer zij optreden in het schermrooster van een pentode in het hoogfrequentie of middenfrequentiegedeelte van een ontvangtoestel. Is bij een dergelijke buis de bracht. De resonantiefrequentie van dit rooster bedroeg 1900 Hz.

In *fig. 18* is het uiteinde zichtbaar van een katode die enige speling vertoonde in de bovenste micasteun van het elektrodesysteem en hierdoor bij een vrij lage frequentie (600 Hz) kon trillen. De trillingen van de katode zijn meestal meer gedempt dan die van andere onderdelen, door de invloed van de gloeidraad met zijn isolatie en van de zich op de katode bevindende emitterende laag.

Trillingen van één der delen van een anode bij een frequentie van 1300 Hz zijn in *fig. 19* zichtbaar.



a *b*

Fig. 17. *a*) Elektrodesysteem van een triode-hexode. In de cirkel is door een gat in de anode van de triode het rooster zichtbaar, dat in *b*) in trillende toestand is afgebeeld bij zijn resonantiefrequentie van 1900 Hz.

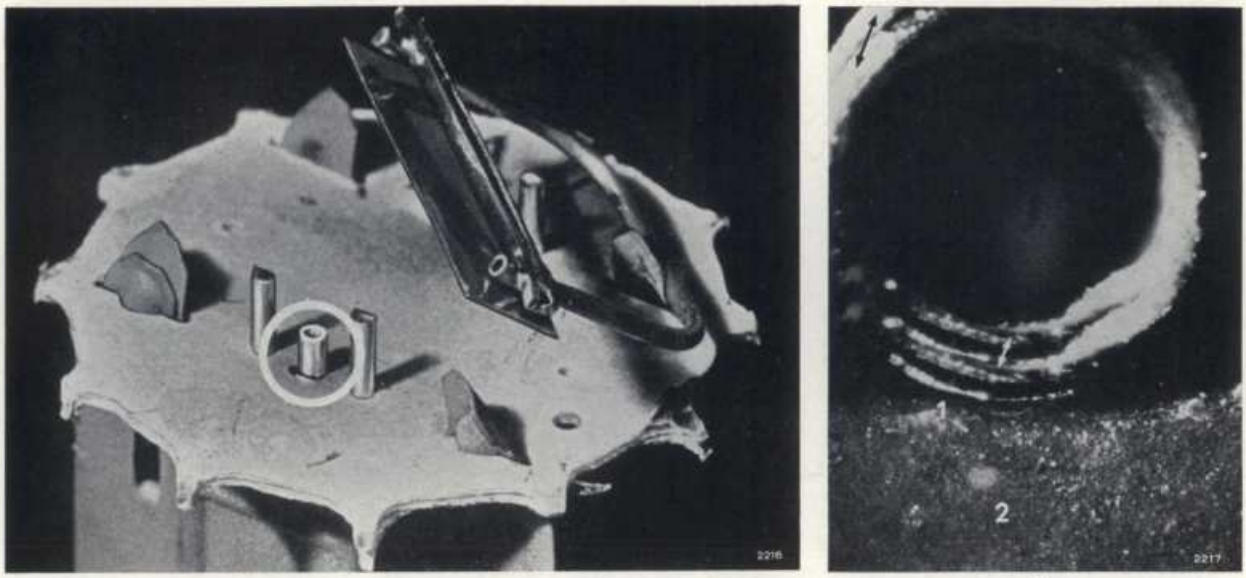
steilheid door de automatische sterkteregeling tot een kleine waarde gereduceerd, dan passeert de elektronenstroom slechts enkele schermroosterwindingen. Een kleine beweging van één dezer windingen heeft dan een grote invloed op de anodestroom en de steilheid. Werkt een dergelijke buis bij een grotere steilheid dan is de invloed van een trillende winding van één der roosters minder groot. Meer hinder wordt dan ondervonden van trillingen die de roosterstaven uitvoeren, doordat hierbij het gehele rooster zijdelings beweegt. *Fig. 17* toont het op deze wijze trillende rooster van het triodegedeelte van een triode-hexode. Ook voor deze waarneming moest in de anode een gat worden aangebracht. De mogelijkheid tot deze trilling was ontstaan doordat de bevestiging van de beide anodedelen aan elkaar ter plaatse van de pijlen niet op de juiste manier was uitgevoerd.

Dat deze methode van onderzoek ook kan worden gebruikt bij hogere frequenties dan de hierboven genoemde, toont *fig. 20*, waar de trillingen te zien zijn die een der draden van een raamrooster uitvoerde [4]). De frequentie bedroeg 37 000 Hz. Het behoeft geen betoog dat hierbij zeer hoge eisen

[4]) De constructie van een dergelijk rooster is beschreven door G. Diemer, K. Rodenhuis en J. G. van Wijngaarden, De EC 57, een schijftriode voor microgolven met L-katode, Philips techn. T. **18**, 321-328, 1956.

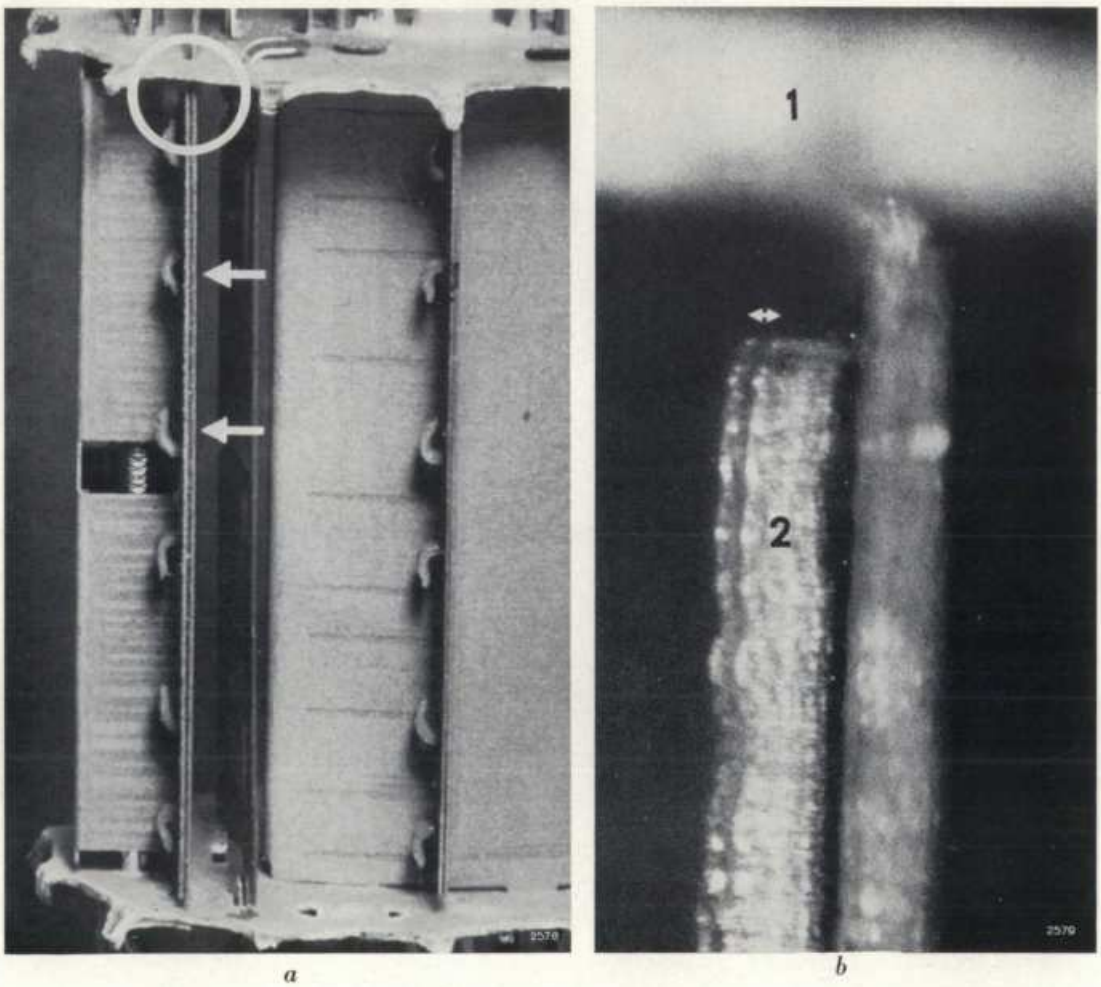
Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023



a *b*

Fig. 18. *a*) Bovenzijde van het elektrodesysteem van een elektronenbuis. In de cirkel het uiteinde van de katode, dat enige speling vertoont in het gat in de micaschijf.
b) Het beeld in de microscoop wanneer de buis met de resonantiefrequentie van de katode (600 Hz) in trilling wordt gebracht.

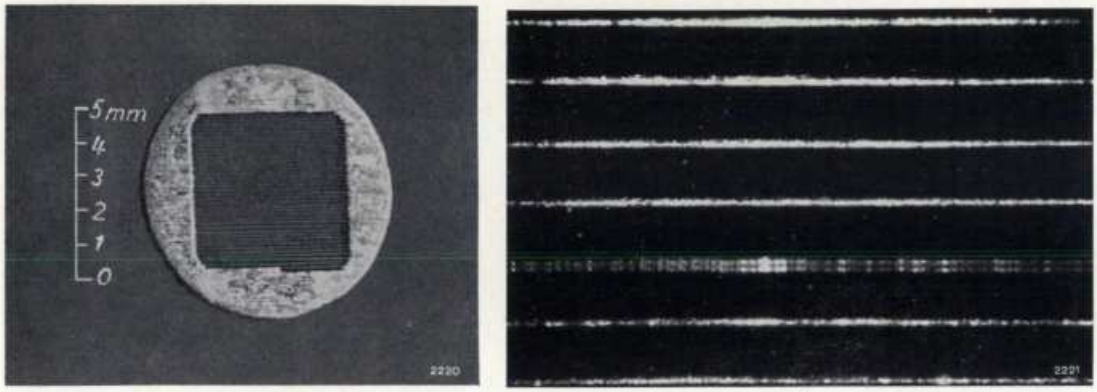


a *b*

Fig. 19. *a*) Anode van een elektronenbuis. De bevestiging van de beide delen was bij de pijlen niet voldoende stevig, waardoor deze delen ten opzichte van elkaar konden bewegen.
b) Het beeld in de microscoop van het gedeelte in de cirkel voor het geval dat de buis met een frequentie van 1300 Hz in trilling wordt gebracht.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023



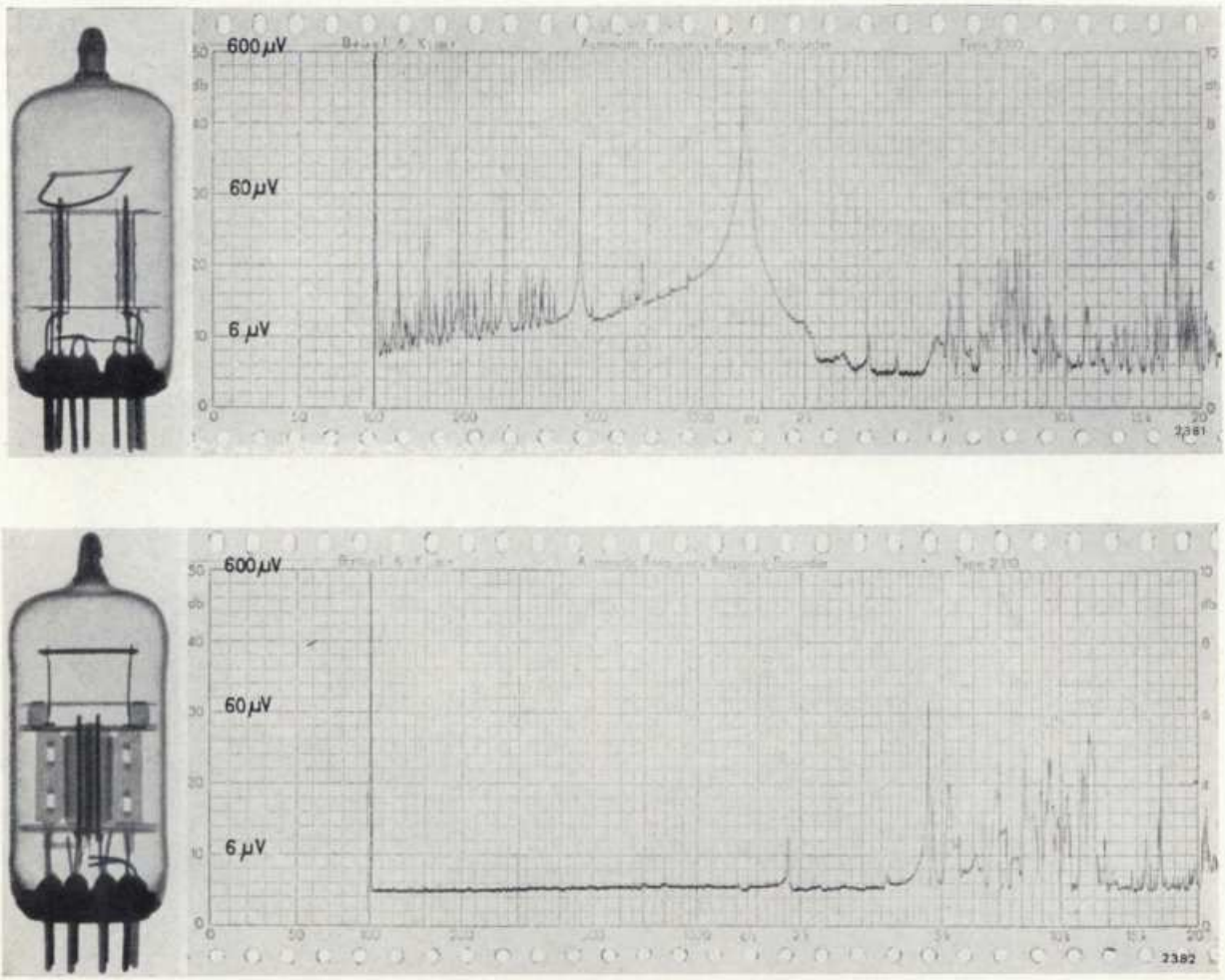
a *b*

Fig. 20. *a*) Raamrooster uit een buis voor zeer hoge frequenties.
b) Het beeld in de microscoop voor het geval dat dit rooster met de resonantiefrequentie van één der draden (37 000 Hz) in trilling wordt gebracht.

worden gesteld aan de triller en ook aan de rest van de schakeling, zoals aan de stroboscooplamp, die uiterst korte lichtimpulsen moet geven om een voldoend scherp beeld te verkrijgen.

Voorbeelden van de bestrijding van microfonie

Wanneer eenmaal is vastgesteld dat een onderdeel een belangrijke bijdrage levert tot de microfonie van een elektronenbuis, is het natuurlijk van veel



a

b

Fig. 21. Invloed van de constructie van de getter op de microfonie van een buis. De beide vergeleken getterconstructies zijn links te zien. De met *b* aangeduide constructie is wat betreft microfonie de beste.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

belang na te gaan in hoeverre uit een aangebrachte verbetering ook werkelijk een vermindering van de microfonie resulteert. Men kan dit het beste doen door met behulp van een registrerende meter een spectrogram op te nemen van de door microfonie van een bepaalde buis veroorzaakte signaalspanning als functie van de trillingsfrequentie. We zullen dit illustreren met enkele voorbeelden van aangebrachte verbeteringen. De figuren 21 t/m 24 tonen een aantal spectrogrammen die zijn opgenomen terwijl de in onderzoek zijnde buizen aan trillingen met een constante versnellingsamplitude van $\frac{1}{3}$ m/sec^2 waren onderworpen in de dwarsrichting van het elektrodesysteem. In de figuren is aangegeven de effectieve waarde van de roosterwisselspanning die een zelfde storend signaal opwekt als hetgeen door de microfonie wordt veroorzaakt.

Fig. 21 illustreert het effect dat werd bereikt door een wijziging in de ondersteuning van de getter. De bovenste figuur werd opgenomen aan een buis waarbij de getter was bevestigd aan een beugel, die met één punt aan de anode was gelast. De sterke microfonie die optrad bij een frequentie van 1300 Hz, bleek aan deze getter te wijten te zijn. Werd de getter op twee plaatsen bevestigd in de micasteun, dus niet met één der elektrodes verbonden, dan werd een aanzienlijke verbetering verkregen, zoals het onderste spectrogram toont. Bij frequenties lager dan 1850 Hz is de buis nu vrij van microfonie.

Fig. 22 toont de verbetering die werd bereikt door een enkelvoudige bevestigingslip van de anode te vervangen door een dubbele, waardoor de speling die eerst in het mica optrad, verdwenen was. Bij de constructie volgens de bovenste figuur konden de beide delen van de anode ten opzichte van elkaar trillen, wat bij de in het onderste deel van de figuur weergegeven constructie in veel mindere mate het geval was. De hoge piek bij ongeveer 780 Hz in het bovenste spectrogram is hierdoor in het onderste verdwenen.

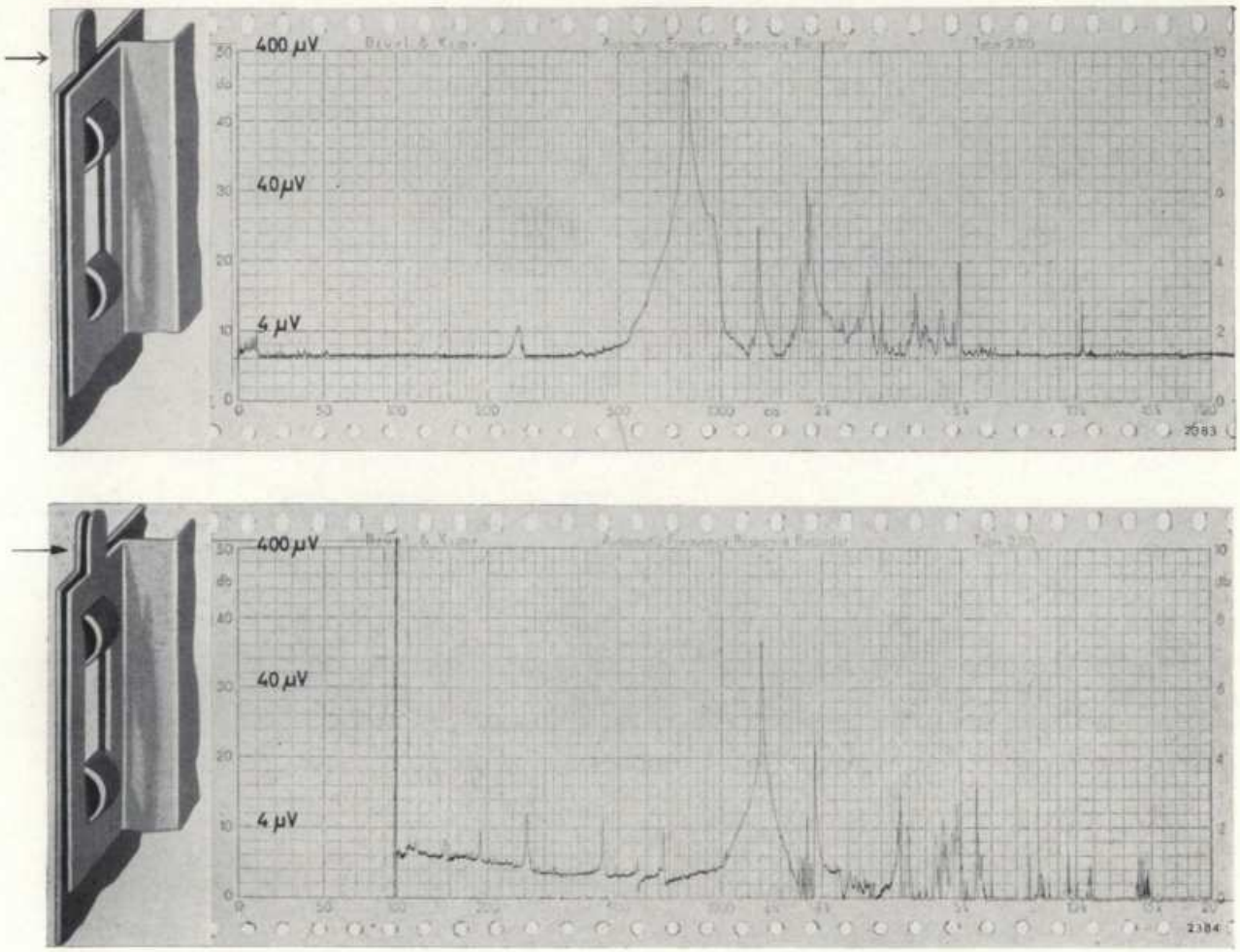


Fig. 22. Invloed van de bevestiging van de anode op de microfonie van een buis. De bevestigingsmethode met een enkelvoudige lip (*a*) is slechter dan die met een dubbele lip (*b*).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

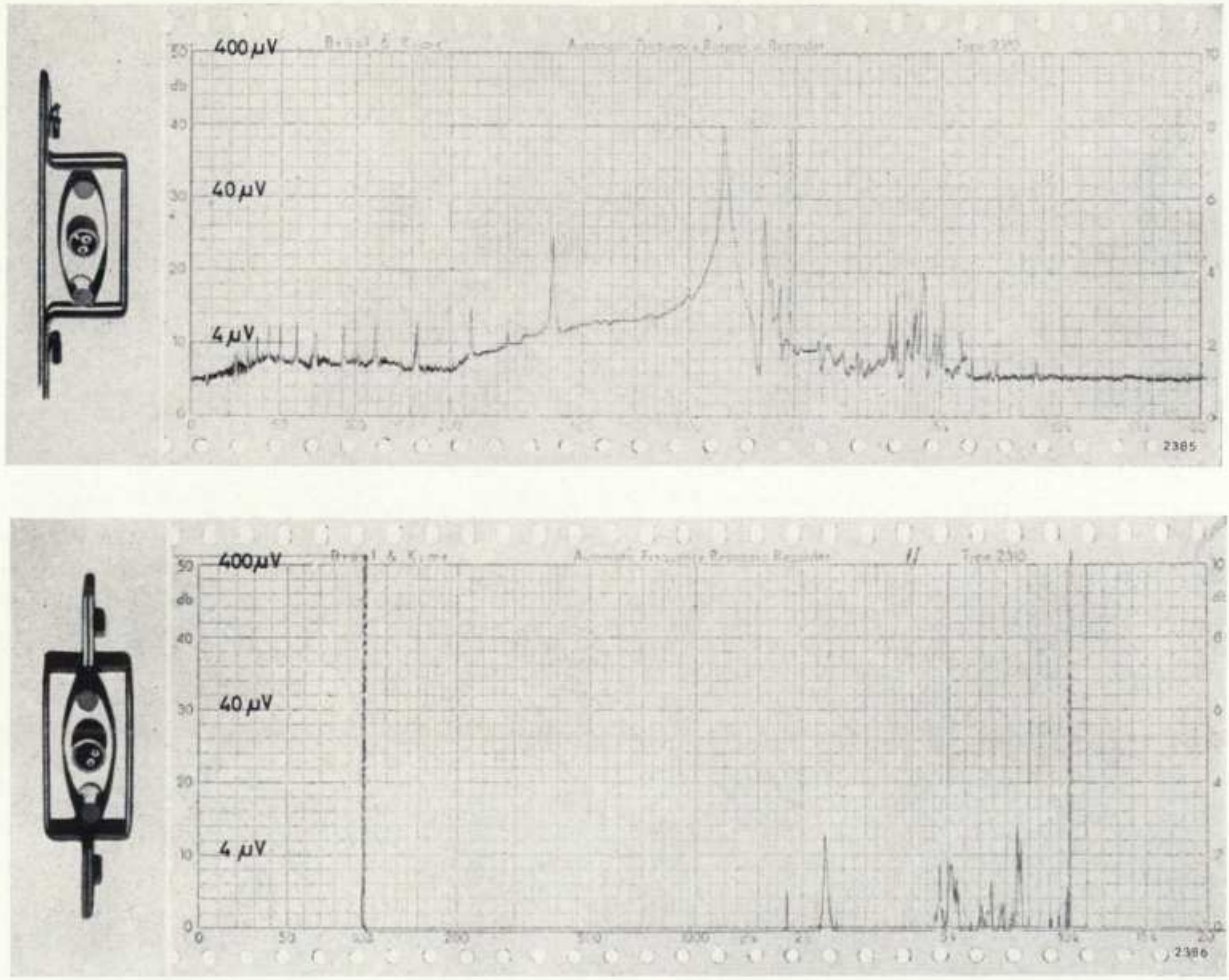


Fig. 23. Invloed van de constructie van de anode op de microfonie. De in (*a*) aangegeven constructie is veel slechter dan de in (*b*) getoonde.

De verbetering die in een ander geval werd verkregen door een gewijzigde constructie van de anode, blijkt uit *fig. 23*. Een anode die uit twee rechthoekig omgezette gedeelten bestaat (onderste figuur), is veel stijver dan een anode waarbij een der delen vlak is (bovenste figuur). De grote verbetering uit het oogpunt van microfonie komt in de beide spectrogrammen treffend tot uiting.

Wanneer de verschillende onderdelen die aanleiding geven tot microfonie, systematisch worden opgespoord en verbeterd, kan een resultaat worden verkregen zoals in *fig. 24* is geïllustreerd. De bovenste figuur geeft hier het spectrogram weer van een buis die bij verschillende frequenties een zeer hinderlijke microfonie vertoonde. Na het aanbrengen van de noodzakelijke verbeteringen in de constructie werd het onderste spectrogram verkregen, waaruit blijkt dat deze buis zo goed als vrij is van microfonie.

Het is niet altijd mogelijk alle verbeteringen die met het oog op microfonie wenselijk zouden zijn, ook werkelijk in de serieproduktie van de buizen in te voeren. Vaak spelen ook overwegingen van geheel andere aard een rol, zoals de invloed die de gewenste verbeteringen hebben op de elektrische eigenschappen van de buis, op de kostprijs of op het benodigde gereedschap. Wanneer echter de oorzaken der microfonie voldoende bekend zijn — en met de in het bovenstaande beschreven methodes zijn deze vrijwel altijd op te sporen —, kan meestal een oplossing worden gevonden die ook uit andere oogpunten dan die der microfonie bevredigt.

Microfonieonderzoek met behulp van ruis

De in het voorgaande beschreven methode levert bij het opsporen van de oorzaken van microfonie vele goede resultaten op. In bepaalde gevallen kan echter met een eenvoudiger en minder tijdrovend onderzoek worden volstaan. Dit kan het geval zijn wanneer men niet de oorzaken van microfonie wil nagaan, doch uitsluitend buizen onderling wil vergelijken, b.v. om statistische gegevens te verzamelen omtrent het effect van bepaalde wijzigingen in de constructie. In dergelijke gevallen kan men vaak volstaan met het opnemen van een spectrogram.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

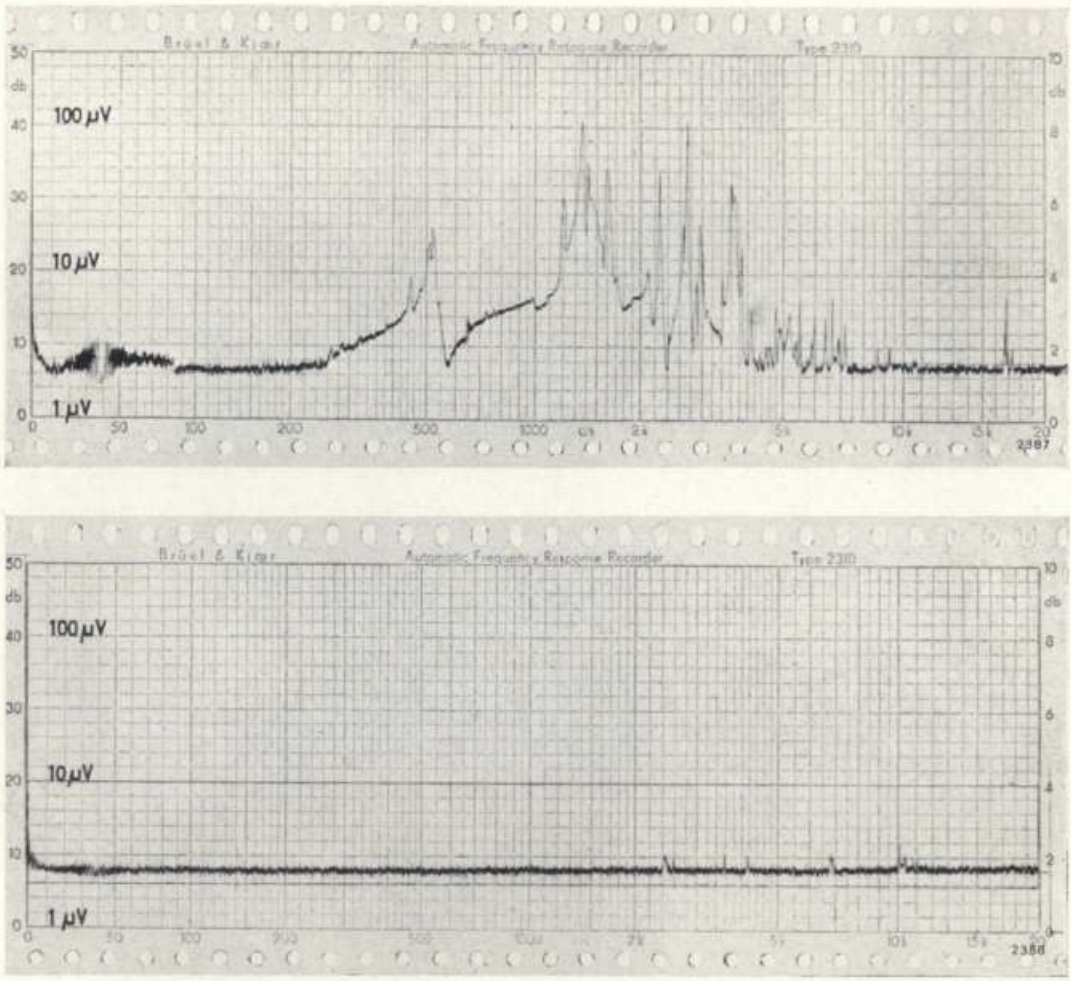


Fig. 24. Spectrogrammen van een buis *a*) vóór en *b*) na het aanbrengen van een aantal verbeteringen ten aanzien van microfonie.

Gebeurt dit op de hierboven beschreven wijze, dus door de buizen te onderwerpen aan sinusoïdale trillingen met een veranderlijke frequentie, dan is voor het verkrijgen van een goed spectrogram toch altijd een tijd van enkele minuten nodig. Men mag nl. hierbij de frequentie niet te snel variëren, omdat, zoals wij hierboven reeds hebben uiteengezet, de mechanische trillingen van onderdelen van elektronenbuizen zeer weinig zijn gedempt en hierdoor bij een te snel verlopen van de proef het gevaar bestaat dat sommige pieken in het spectrogram niet worden gevonden.

Bij een methode die wij tot slot in het kort willen beschrijven, heeft men een sneller verloop trachten te verkrijgen door aan de triller waarop de buis is bevestigd, niet een sinusoïdale wisselstroom toe te voeren waarvan de frequentie wordt gevarieerd, doch een stroom die componenten met alle frequenties gelijktijdig bevat, dus een stroom die door een ruisbron wordt geleverd. In dit geval zullen alle onderdelen die in het te onderzoeken frequentiegebied resonantiefrequenties hebben, gelijktijdig in deze resonantiefrequentie worden aangestoten. Wordt de buis in een versterkschakeling opgenomen, dan ontstaat door microfonie een spanning die is samengesteld uit vele wisselspanningscomponenten. Het meten van de effectieve waarde van deze spanning geeft reeds een indruk van de mate waarin de onderzochte buis „microfonisch" is, doch een beter inzicht kan men verkrijgen als men de spanningscomponenten meet met behulp van een selectieve spanningsmeter, die slechts de spanning in een smal frequentiegebied aangeeft. Door dit smalle gebied over de gehele te onderzoeken frequentieband te verschuiven, kan men weer een spectrogram verkrijgen. Een en ander kan nu zodanig worden uitgevoerd dat dit direct op een oscilloscoopscherm zichtbaar is.

Fig. 25 toont als voorbeeld een op deze wijze verkregen spectrogram. Het is mogelijk gebleken goed reproduceerbare

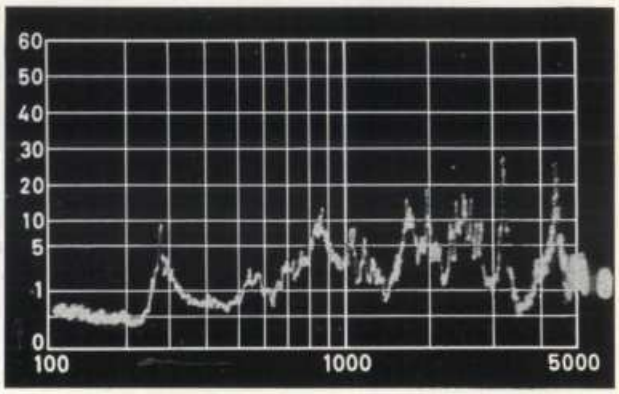


Fig. 25. Beeld op het oscilloscoopscherm bij microfonieonderzoek volgens de ruismethode.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

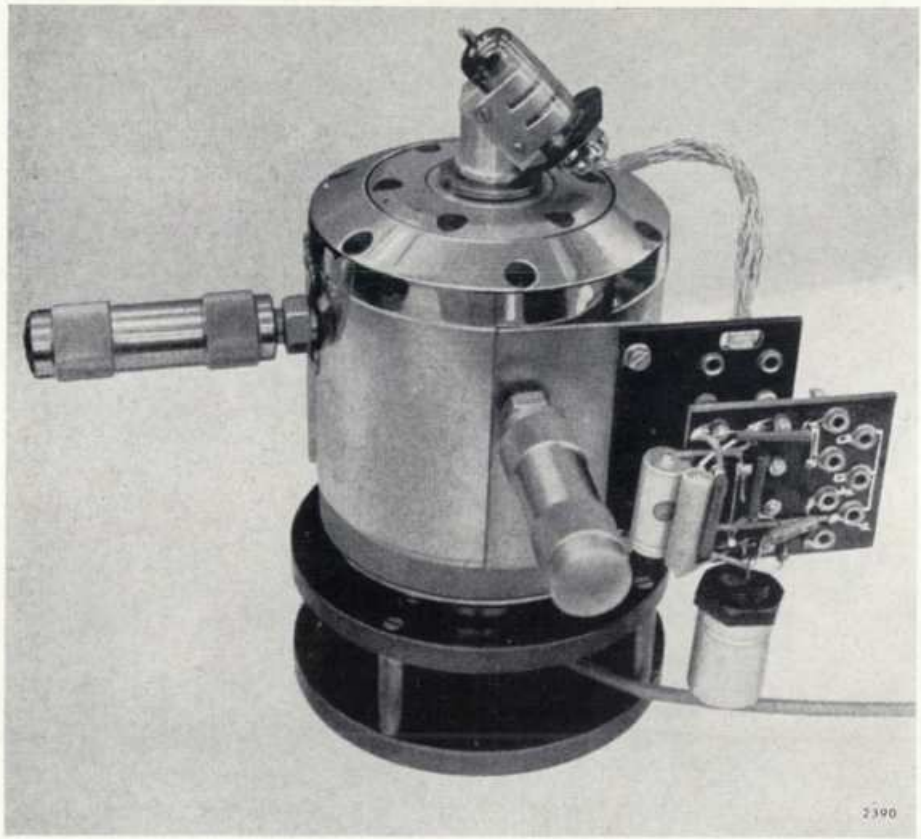


Fig. 26. Triller, gebruikt bij microfonieonderzoek volgens de ruismethode. De onderzochte buis is in een schuine stand op het apparaat vastgeklemd.

grafieken te verkrijgen als de selectieve spanningsmeter het gehele frequentiegebied in ongeveer 15 sec doorloopt. Bij gebruik van een lang nalichtende oscilloscoopbuis is dit voldoende snel om het gehele spectrum tegelijk te kunnen zien.

In *fig. 26* is een triller afgebeeld die werd gebruikt voor microfonieonderzoek met ruis. De buis is in een schuine stand op het apparaat bevestigd, om op deze wijze een algemeen beeld van de microfonie-eigenschappen te verkrijgen. De buis trilt nu nl. gelijktijdig in de lengte- en in de dwarsrichting.

Een bezwaar van de ruismethode is dat de hoogte waarmede pieken in het spectrogram worden weergegeven, afhankelijk is van hun breedte. Immers, de selectieve versterker laat een bepaalde smalle frequentieband door, en de verticale afbuiging van de oscilloscoop is evenredig met de waarde van het microfoniesignaal, gemiddeld over deze gehele frequentieband. Een piek die smaller is dan de doorgelaten bandbreedte, wordt hierdoor minder hoog weergegeven dan een even hoge, doch bredere piek. Het beeld op het oscilloscoopscherm geeft dus geen exacte voorstelling van het spectrogram, en bij de beoordeling moet men met deze omstandigheid rekening houden.

Mede om deze reden is de ruismethode geen succes geworden. Het is nl. gebleken dat, als men de genoemde fout op de koop toe wil nemen, ook bij het gebruik van sinusoïdale trillingen een versneld onderzoek zeer wel mogelijk is. Doorloopt men hierbij het gehele frequentiegebied in een korte tijd, b.v. eveneens in 15 sec, dan worden ook hier de hoge pieken in het spectrogram niet in de juiste verhouding weergegeven. Toch is het op deze wijze verkregen beeld nog beter dan hetgeen men met de ruismethode verkrijgt. Dit laatste feit, te zamen met de omstandigheid dat een opstelling voor microfonie-onderzoek met ruis veel gecompliceerder is dan een installatie voor sinusoïdale trillingen, heeft gemaakt dat in onze laboratoria aan de laatstgenoemde methode de voorkeur wordt gegeven.

Samenvatting. Verschillende methodes worden beschreven waarmee men elektronenbuizen kan onderzoeken met betrekking tot microfonie. Enkele direct op de praktijk gebaseerde methodes zijn wel bruikbaar voor het onderling vergelijken van buizen, doch geven geen uitsluitsel omtrent de oorzaak van de optredende microfonie. Om dit laatste mogelijk te maken, is een triller geconstrueerd waarmede een buis kan worden onderworpen aan een trilling met een constante versnellingsamplitude en een veranderlijke frequentie. Met behulp van een microscoop en stroboscopische belichting kan men nu rechtstreeks waarnemen welke onderdelen door hun trillingsmogelijkheid aanleiding tot microfonie geven. Enkele bereikte resultaten worden met spectrogrammen geïllustreerd. Ten slotte wordt nog een methode beschreven waarbij een ruisgenerator wordt gebruikt. Het spectrogram wordt hierbij op het scherm van een oscilloscoop zichtbaar.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

VERWARMING VAN SPIJZEN IN EEN MAGNETRONFORNUIS

door W. SCHMIDT *).

621.373.029.6:621.365.55

Er bestaat een groeiende belangstelling voor een nieuwe manier om spijzen toe te bereiden, nl. door middel van diëlektrische verhitting in een kortgolvig elektromagnetisch stralingsveld. Dit is een zeer snelle, hygiënische, en tevens behoedzame manier om rauwe, koude of bevroren spijzen resp. gaar te maken, te verwarmen of te ontdooien. Voor deze methode moet men beschikken over geschikte energiebronnen; deze zijn thans voorhanden in de vorm van twee typen magnetrons die continu resp. 2 kW en 5 kW kunnen leveren. Voorlopig zal men hiermee uitgeruste „magnetronfornuizen" hoofdzakelijk aantreffen in hotels en restaurants, waar men in korte tijd een groot aantal gerechten moet kunnen serveren. Het is evenwel niet uitgesloten dat het magnetronfornuis op den duur ook in de keukens van particuliere huishoudens zal doordringen.

Hoogfrequentieverwarming van materialen is in de laatste decennia op steeds grotere schaal toegepast in verschillende takken van industrie [1]). Bij capacitieve (diëlektrische) verwarming wordt aan het afgegeven vermogen een grens gesteld doordat de doorslagsterkten van het te verhitten materiaal en van de isolatie geen willekeurig hoge spanningen toelaten. Alleen door de frequentie op te voeren, kan men hier het vermogen vergroten; daarom streeft men voor diëlektrische verwarming naar steeds hogere frequenties.

In dit opzicht betekende de ontwikkeling van magnetrons voor een continu vermogen van 2 en 5 kW een belangrijke stap vooruit [2]). Deze magnetrons werken met frequenties in de buurt van 2400 MHz, dus in het microgolfgebied, en ze zijn zeer geschikt voor diëlektrische verwarming van niet-geleidende stoffen. Naast mogelijke toepassing in de industrie, b.v. voor het drogen van hout en van textielprodukten of voor het lassen van kunststoffen, is het verwarmen van voedingsmiddelen, dus de bereiding van spijzen in een „magnetronfornuis", een veelbelovend toepassingsgebied voor deze magnetrons. In dit artikel gaan wij in op enkele der problemen die zich voordoen bij de constructie van zo'n fornuis, waarin het magnetron voor 2 kW wordt gebruikt.

Bij de gebruikelijke methodes voor het bereiden van spijzen (koken, braden, bakken, grilleren) wordt de warmte toegevoerd door convectie en geleiding in water of vet, door direct contact met de verhitte pan of door warmtestraling. In al deze gevallen kan de warmte slechts door geleiding in het inwendige van de spijzen doordringen. Het temperatuurverval dat hiervoor nodig is, kan men echter niet willekeurig groot maken, want de buitenkant der spijzen mag een zekere temperatuur niet overschrijden. Daardoor duurt het verwarmingsproces veel langer dan bij de diëlektrische methode, waarbij het warmtegeleidingsvermogen der spijzen geen grote rol speelt. Bij diëlektrische verhitting kunnen de spijzen, gelegen op een schaal van glas of aardewerk of zelfs op papier of karton, en zonder toevoeging van water of vet, in $\frac{1}{4}$ tot $\frac{1}{8}$ van de normale tijd worden verhit, zonder dat de buitenkant daarbij uitdroogt of het papier verbrandt. Voorgekookte of bevroren spijzen kan men zonder bezwaar opnieuw warm maken, daar de vitaminen en de natuurlijke voedings-, smaak- en kleurstoffen in hoge mate behouden blijven. Er bestaan bepaalde trucs om met de microgolfstraling ook het bruine korstje te voorschijn te roepen, waaraan wij bij de normale bak- en braadmethodes gewend zijn; meestal echter zal men voor dit doel een afzonderlijke grilleerinrichting in het fornuis aanbrengen.

Het gebruik van een magnetronfornuis heeft vooral voor hotels en restaurants grote voordelen: niet alleen zijn de spijzen sneller gereed, maar zij kunnen ook van te voren reeds worden toebereid om vlak voor het ogenblik van serveren warm te worden gemaakt. Op deze manier kan men het huidige tekort aan personeel gedeeltelijk compenseren. In de dieetkeukens van ziekenhuizen kan, zoals de ervaring reeds heeft bewezen, het menu voor b.v. vetarme dieetkost aanzienlijk meer gevarieerd worden. Ten slotte kan een magnetronfornuis ook in particuliere huishoudens goede diensten bewijzen: een huisvrouw die tevens een beroep uitoefent, zal bij het bereiden van de maaltijden veel tijd kunnen sparen, vooral wanneer de levensmiddelenindustrie er meer

*) Ontwikkellaboratorium van de Valvo GmbH, Radioröhrenfabrik Hamburg.

[1]) Zie b.v. E. C. Witsenburg, Verhitting door hoogfrequente velden, I. Inductieve verhitting, en M. Stel en E. C. Witsenburg, Verhitting door hoogfrequente velden, II. Capacitieve verhitting, Philips techn. T. **11**, 165-175, en 236-243, 1949.

[2]) W. Schmidt, Das Dauerstrichmagnetron Valvo 7091, Elektron. Rdsch. **12**, 309-314, 1958; ook: Continuous wave magnetrons types 7091 and 7292, Electron. Appl. **20**, 13-23, 1959/60 (no. 1).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

toe zal overgaan toebereide spijzen b.v. in bevroren vorm op de markt te brengen.

In dit artikel zullen we, uitgaande van de fysische principes die aan de verwarming in een hoogfrequent stralingsveld ten grondslag liggen, uiteenzetten hoe men een magnetronfornuis kan construeren. Vervolgens bespreken we het door Philips in de handel gebrachte continumagnetron voor 2 kW. Daarna gaan wij in op de problemen die zich voordoen bij het ontwerpen van de oven, dus van de ruimte waarin de spijzen worden verwarmd. Ten slotte wordt aan de hand van een laboratoriumuitvoering de praktische realisatie van een magnetronfornuis besproken.

Grondslagen van de diëlektrische verwarming in een stralingsveld van microgolven

Bij de gebruikelijke frequenties voor hoogfrequentieverhitting bestaan de trillingskringen uit condensatoren en spoelen. Geleidende lichamen kan men in het magnetische veld van een spoel door wervelstromen verhitten; niet-geleidende stoffen brengt men in het elektrische wisselveld van een condensator, waar de diëlektrische verliezen de gewenste verhitting veroorzaken. In het microgolfgebied, dus bij frequenties boven 1000 MHz, bestaan de trillingskringen uit trilholten, waarin het elektrische en het magnetische veld zo innig verweven zijn dat men ze in de praktijk vrijwel niet kan scheiden. Men kan hier de te verwarmen substantie in zo'n trilholte brengen. De „oven" van een magnetronfornuis bestaat dan ook uit een ruimte van de gewenste afmetingen en met metalen (goed geleidende) wanden. De microgolfenergie wordt door golfgeleiders naar de oven geleid. Door reflexies tegen de wanden vult zich de ovenruimte geheel met een stralingsveld waarin dus de te verhitten voorwerpen worden gebracht. De methode kan alleen worden toegepast voor diëlektrische verwarming van niet-metallieke voorwerpen, daar goed geleidende voorwerpen de elektromagnetische golven nagenoeg volledig reflecteren.

Zou in een bijzonder geval een zuiver capacitieve of een zuiver inductieve verhitting met microgolven gewenst zijn, dan is dit alleen mogelijk in een kleine rechthoekige trilholte waarvan de uiteinden in cirkelcilindrische ruimten uitlopen en waarvan de lengte ten hoogste $\lambda/4$ mag zijn. In het rechthoekige middengedeelte beschikt men dan over een elektrisch wisselveld tussen twee wanden die zich, bij de genoemde frequentie van 2400 MHz (waarbij $\lambda/4 = 31$ mm), op slechts 5 mm van elkaar bevinden; en in de cilindrische uitbreidingen over een magnetisch wisselveld van 10 mm diameter. De te verhitten voorwerpen zouden zo klein moeten zijn dat ze in deze velden een plaats kunnen vinden. Voor de praktijk heeft deze mogelijkheid daarom nauwelijks betekenis.

Als in een medium een elektrisch wisselveld met amplitude E heerst, wordt per eenheid van volume en tijd een warmte P_w ontwikkeld, waarvoor geldt:

$$P_w \sim E^2 f \sqrt{\varepsilon_r} \operatorname{tg} \delta. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

Hierin is f de frequentie, ε_r de relatieve diëlektrische constante en δ de verlieshoek. Uit deze betrekking blijkt het voordeel van de toepassing van microgolffrequenties: reeds bij kleine E kan de warmteontwikkeling groot zijn door de grote waarde van f. Terwijl bij lagere frequenties de doorslagsterkte van de te verhitten substantie een grens stelt aan de ontwikkelde warmte, geschiedt dit in het microgolfgebied voorlopig slechts door het vermogen dat de generator maximaal kan leveren.

Plant zich door het (niet-magnetische) medium een elektromagnetische golf voort, dan veroorzaakt de warmteontwikkeling een demping van deze golf: de energiedichtheid van de golf neemt in de voortplantingsrichting af. Voor de „indringingsdiepte" z_i, die op de gebruikelijke manier wordt gedefinieerd als de afstand waarop de energiedichtheid tot $1/e \approx 37\%$ is gedaald, geldt, voor een vlakke golf die loodrecht invalt [3]):

$$z_i = \frac{1}{f \sqrt{\varepsilon_r} \operatorname{tg} \delta} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (2)$$

Tabel I bevat voor enige voedingsmiddelen de waarde van z_i, berekend uit metingen van ε_r en tg δ. Men ziet dat deze indringingsdiepte voor sommige substanties tamelijk klein is. Bij enigszins grote

Tabel I. Waarden van ε_r en tg δ voor enige voedingsmiddelen, gemeten bij verschillende temperaturen, en de daaruit berekende (theoretische) indringingsdiepte z_i voor microgolven van 2400 MHz.

Voedingsmiddel	Meettemperatuur °C	ε_r	tg δ	Indringingsdiepte z_i (cm) van de golven bij 2400 MHz
rundvlees, rauw	—15	5,0	0,15	5,8
rundvlees, gebraden	23	28,0	0,2	2,46
hele erwten, gekookt	—15	2,5	0,2	7,9
	23	9,0	0,5	1,5
varkensvlees, rauw	—15	6,8	1,2	0,66
varkensvlees, gebraden	35	23,0	2,4	0,18
aardappelen, gekookt	—15	4,5	0,2	6,1
	23	38,0	0,3	1,44
spinazie, gekookt	—15	13,0	0,5	1,42
	23	34,0	0,8	0,56
pap	—15	5,0	0,3	3,7
	23	47,0	0,8	0,41

[3]) Voor de afleiding van deze formule zie b.v. W. Schmidt, Mikrowellengeneratoren mit abgeschlossenem Arbeitsraum zur dielektrischen Erwärmung von Nahrungsmitteln und Industrieprodukten, Elektron. Rdsch. **12**, 417-420, 1958; ook: Microwave generator coupled to a loaded cavity for dielectric heating of food-stuffs and industrial products, Electron. Appl. **19**, 147-164, 1958/59 (no. 4).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

volumes bestaat dan het gevaar dat de verwarming niet voldoende doordringt. Volgens (2) neemt bij toenemende frequentie de indringingsdiepte af, zodat dat bezwaar zich ernstiger doet voelen naarmate men de frequentie hoger kiest. (Men trekt hiervan juist profijt bij het grilleren. Dan wordt immers ook een elektromagnetisch stralingsveld gebruikt — maar van nog veel hogere frequentie, nl. in het infrarood —, welke straling geheel in de oppervlaklaag wordt geabsorbeerd, en zo het bruine korstje te voorschijn roept.) Het bezwaar is minder ernstig dan het lijkt, daar in een trilholte de energie van alle kanten in de te verwarmen substantie dringt. Bovendien blijkt dat men in de praktijk bij braden, koken en ontdooien van voedingsmiddelen veel betere resultaten bereikt dan men op grond van de theoretische indringingsdiepte uit tabel I zou verwachten.

Magnetrons

Magnetrons werken met een hoog rendement, bij een vaste frequentie, en vormen op zichzelf reeds

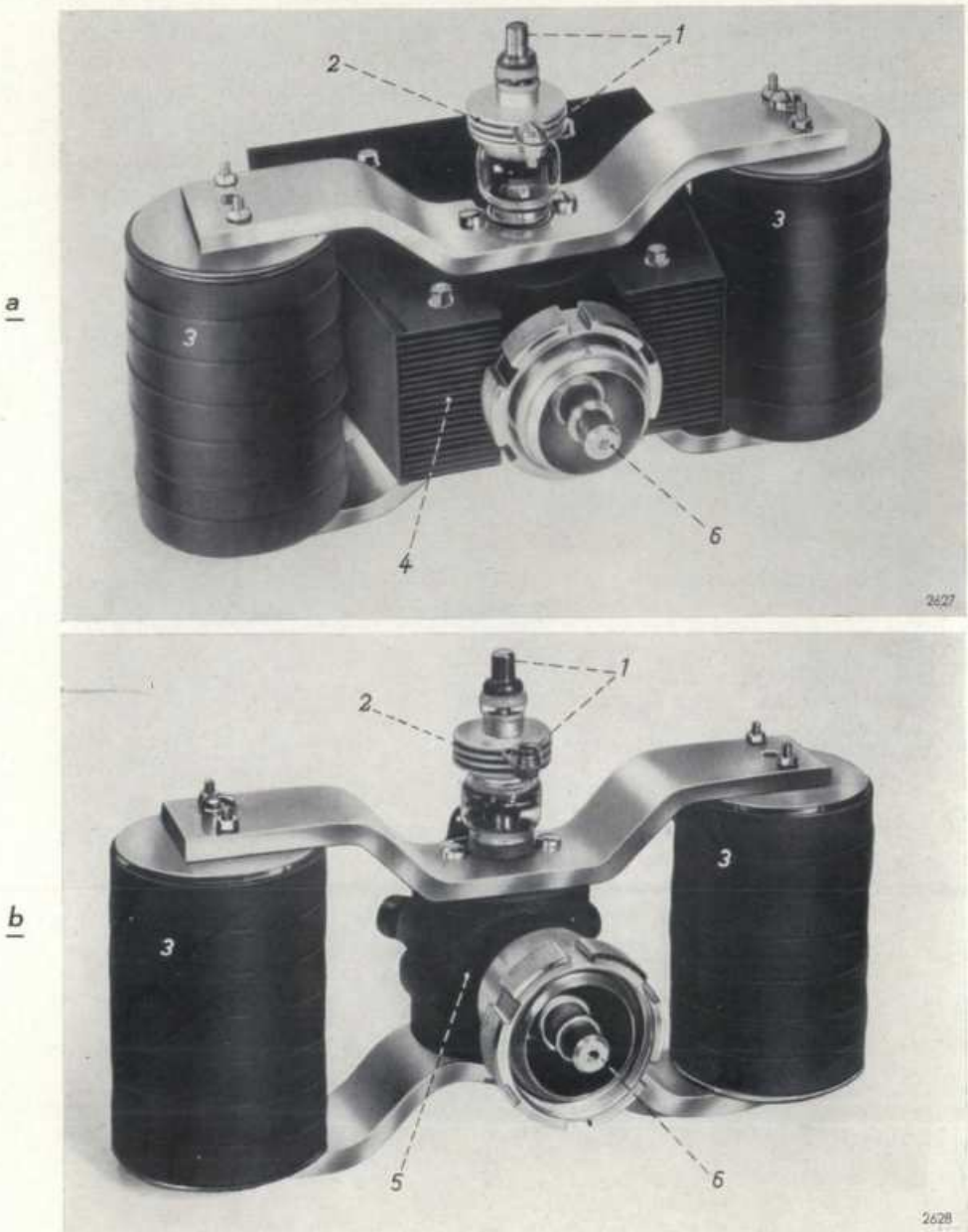


Fig. 1. De continumagnetrons voor 2 kW van type 7091 (*a*, met lucht gekoeld) en type 7292 (*b*, met water gekoeld). *1* gloeidraadaansluitingen, de onderste is tevens katodeaansluiting. *2* katoderadiator. *3* magneetzuilen van ferroxdure. *4* anodeblok met lamellen voor luchtkoeling. *5* anodeblok met waterkoeling. *6* aansluiting voor een coaxiale leiding ($1^5/_8$″) voor het afnemen van het vermogen. De middengeleider van deze leiding wordt met schroefdraad bevestigd. Dit verzekert een goed contact, ook na langdurig gebruik en bij wisselende temperaturen.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

complete generatoren. Daardoor heeft de apparatenconstructeur die een magnetron als microgolfgenerator wil gebruiken, vrijwel niet te maken met hoogfrequentietechnische problemen zoals de constructie en de instelling van het frequentiebepalende trillingssysteem, en van de terugkoppeling.

Als de magnetrons voorzien worden van een geschikte aansluiting voor het afnemen van het vermogen, en als zij bovendien van exemplaar tot exemplaar weinig in eigenschappen verschillen, kan men de vervanging van het magnetron tot een zuiver mechanische handeling terugbrengen.

Constructie van de continumagnetrons 7091 en 7292

Aan impulsmagnetrons, die reeds 20 jaar lang bij radar en bij elektronische navigatiemiddelen toepassing vinden, worden hoge eisen gesteld wat betreft frequentiestabiliteit, impulsvorm en betrouwbaarheid. Bij een continumagnetron voor de opwekking van warmte zijn andere punten van belang zoals: groot rendement, lange levensduur, lage spanningen en grote ongevoeligheid voor variatie in de belasting. Vooral het laatste punt is van belang: de substanties die in een magnetronfornuis verhit worden, verschillen zeer in diëlektrische eigenschappen en in vorm en afmetingen, en leveren daardoor zeer uiteenlopende belastingen voor het magnetron, maar toch moet dit in alle gevallen goed werken. Constantheid van frequentie is van minder belang, want de frequentiegebieden die voor industriële doeleinden ter beschikking staan (en die in de onderscheiden landen bij de wet zijn vastgelegd), zijn tamelijk breed.

De continumagnetrons 7091 en 7292 zijn ontwikkeld voor industriële toepassing, d.w.z. voor die gevallen waarin de opgewekte hoogfrequentie-energie gebruikt wordt voor verhitten, drogen en sinteren van niet-geleidende stoffen, of — zoals in een magnetronfornuis — voor het verwarmen van spijzen. De laatstgenoemde toepassing is overigens de eerste die gerealiseerd werd. Beide typen magnetrons leveren een maximumvermogen van 2500 watt bij een frequentie van ca. 2400 MHz [2]). Het type 7091, dat van luchtkoeling is voorzien, is ontwikkeld voor fornuizen die gemakkelijk verplaatsbaar moeten zijn *(fig. 1a)*. Het type 7292 bezit waterkoeling en is bedoeld voor vast opgestelde fornuizen (fig. 1*b*). Voor zover zij geen betrekking hebben op de koeling, zijn de technische gegevens voor de twee typen hetzelfde.

Onlangs werd ook de ontwikkeling van een continumagnetron voor zeer groot vermogen, nl. voor 5 kW, voltooid. Dit magnetron is in *fig. 2* afgebeeld. De mogelijkheden die dit nieuwe magnetron biedt

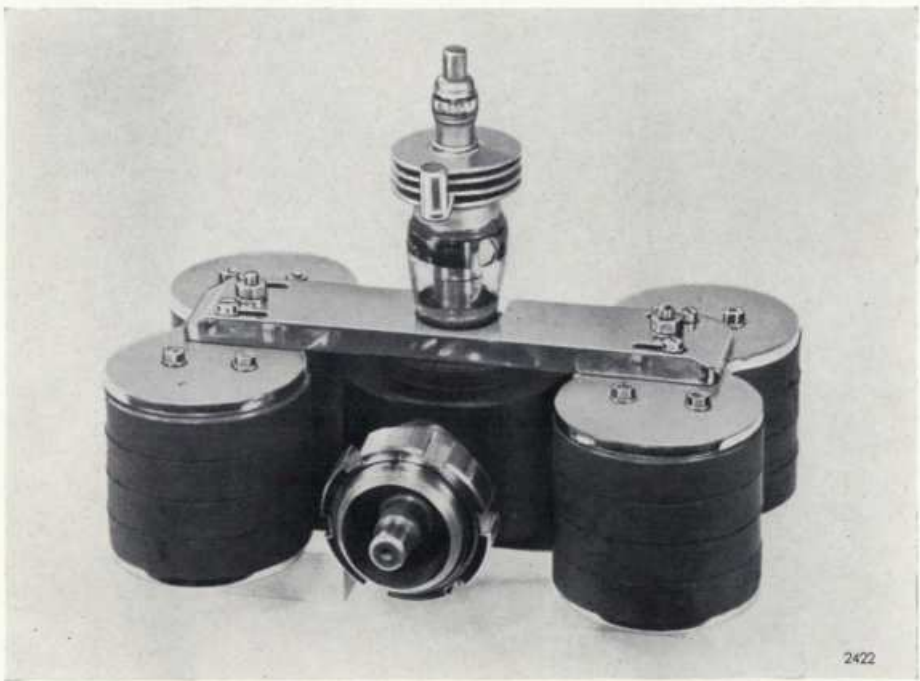


Fig. 2. Het continumagnetron 55125 voor 5 kW. Ook dit magnetron werkt in het frequentiegebied om 2400 MHz. De anode wordt met water gekoeld, terwijl de katoderadiator met een zachte luchtstroom gekoeld moet worden. De waarde van 5 kW voor het geleverde vermogen geldt bij voeding met niet-afgevlakte gelijkspanning, en wel bij een anodespanning van 6,5 kV en een gemiddelde anodestroom van 1,4 A. Het magneetveld wordt hier geleverd door *vier* zuilen van keramische magneten. Evenals bij de magnetrons voor 2 kW wordt het vermogen afgenomen door een coaxiale leiding van 50 Ω.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

voor de toepassing van microgolfenergie, zijn in het onderhavige artikel nog niet beschouwd.

Het trillingssysteem van de magnetrons 7091 en 7292 bestaat uit 20 spleetvormige trilholten [4]). Een coaxiale leiding neemt het vermogen af door middel van twee in balans werkende koppellussen (*fig. 3*).

Daar in het frequentiegebied van 2400 MHz voor het onbelaste trillingssysteem hoge waarden van de kringkwaliteit bereikbaar zijn, kan men de coaxiale uitgangsleiding vast met het magnetron koppelen. Het kringrendement van het magnetron is dan groot, terwijl de stabiliteitsreserve nog voldoende is om reflexies van de belasting, zoals die optreden als de belasting niet precies is aangepast, te kunnen opvangen. Om deze vaste koppeling te realiseren, moet het systeem van koppellussen een groot deel van het magnetische wisselveld in een magnetrontrilholte omvatten. Wegens de mogelijkheid van een grote staandegolfverhouding als gevolg van belastingsreflexie, kunnen in de uitgangsleiding grote stromen optreden; daarom moeten de koppellussen een zo groot mogelijke materiaaldoorsnede hebben, wat de vervulling van de eerstgenoemde eis bemoeilijkt. Bij het uitgangssysteem van een continumagnetron is het daardoor bezwaarlijk aan beide eisen tegelijk te voldoen als men een enkelvoudige koppellus gebruikt. Door de koppellus dubbel uit te voeren, is in de magnetrons 7091 en 7292 de gewenste vaste koppeling gerealiseerd, ondanks een grote materiaaldoorsnede van de lussen — wat een goede warmteafvoer garandeert —, en zonder dat capacitieve koppeling met de trilholte optreedt. Zo'n capacitieve koppeling zou ongunstig zijn voor een stabiele werking.

De binnengeleider van het in fig. 3 afgebeelde uitgangssysteem van de magnetrons 7091 en 7292 gaat over in een kegelvormige vacuümdichting. De doorleiding is geïsoleerd met keramiek, dat mechanisch sterker is dan glas. De diëlektrische verliezen zijn gering, ook als ten gevolge van belastingsreflexie de staandegolfverhouding in de leiding zeer groot wordt. Het uitgangssysteem is voorzien van een genormaliseerde aansluitflens, zodat het magnetron universeel bruikbaar is.

Bij een magnetron treedt, zoals men weet [4]), een bombardement van de katode op door elektronen die uit de pas raken. Deze elektronen, die energie opnemen uit het hoogfrequente veld, zetten deze energie in warmte om als zij op de katode terugvallen. Bij continumagnetrons wordt daardoor de katodebelasting niet begrensd door de emissie per cm², maar door de energiedichtheid in de ruimte tussen anode en katode, betrokken op de katodeoppervlakte. De thermische emissie bedraagt ca. 100 mA/cm², waar nog een aanzienlijke secundaire emissie bij komt. Daar de energie die de terugvallende elektronen aan de katode als warmte afgeven, afhangt van het ingangsvermogen en van de grootte der belastingsreflexie, moeten bij continumagnetrons die bestemd zijn voor industriële toepassingen en waarbij de belastingsreflexie binnen wijde grenzen kan variëren, de katodeoppervlakken mechanisch zeer sterk zijn en grote temperatuurvariaties kunnen verdragen. Normale oxyde- en ook matrixkatodes kunnen bij grote vermogens niet meer aan de eisen voldoen; men is aangewezen op massieve of gesinterde katodes. De magnetrons 7091 en 7292 zijn derhalve voorzien van geïmpregneerde naleveringskatodes [5]), waarbij de elektronen geëmitteerd worden door een gesinterd wolfraamlichaam van bepaalde poreusheid. Dit lichaam is geïmpregneerd met een substantie die de emissie bevordert. Ook bij hoge en variërende temperaturen zijn bij zo'n katode een stabiele emissie en een lange levensduur gewaarborgd. Doordat het wolfraamlichaam mechanisch sterk is, is dit soort katode bestand tegen het elektronenbombardement en tegen doorslagverschijnselen die soms optreden bij overbelasting.

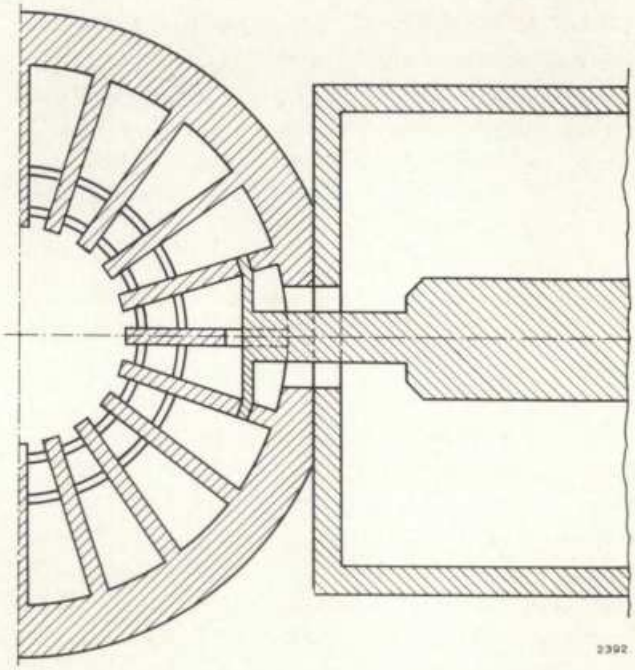


Fig. 3. Systeem voor het afnemen van het vermogen van de magnetrons 7091 en 7292 (uitgangssysteem). De binnengeleider van de coaxiale leiding die het vermogen afneemt, is door middel van een T-vormige koppel-„lus" met *twee* der trilholten van de anode gekoppeld. De schotten die de trilholten scheiden, zijn door twee metalen ringen afwisselend verbonden, zg. „ringstrapping".

[4]) Voor een algemene beschrijving van de werking en de constructie van magnetrons verwijzen wij naar J. Verweel, Magnetrons, Philips techn. T. **14**, 50-64, 1952. Zie ook: G. A. Espersen en B. Arfin, Een magnetron voor bakenzenders op 3 cm golflengte, Philips techn. T. **14**, 250-258, 1952, en J. Verweel en G. H. Plantinga, Een serie impulsmagnetrons met L-katode voor centimeter- en millimetergolven, Philips techn. T. **21**, 1-10, 1959 (no. 1).

[5]) Zie R. Levi, Naleveringskatodes, III (De geïmpregneerde katode), Philips techn. T. **19**, 235-239, 1957.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Een bijzonderheid is dat de gloeispiraal vrijstaand is aangebracht en dus het katodebuisje slechts door straling verhit. Er is dus afgezien van de gebruikelijke isolatie — b.v. met aluminiumoxyde — van de gloeispiraal. Bij veel toepassingen — waartoe ook die in het magnetronfornuis, speciaal in hotels en restaurants behoort — blijft namelijk de gloeidraad uren achtereen ingeschakeld, terwijl slechts nu en dan hoogfrequentievermogen wordt afgenomen. De tot nu toe verkregen ervaring heeft uitgewezen dat onder zulke omstandigheden de vrijstaande gloeidraad goed voldoet. Deze uitvoering was hier goed mogelijk, doordat de gloeispiraal bestaat uit een bijzonder dikke en dus stevige draad, nl. met een diameter van 1,2 mm.

Bij apparaten voor huishouding en industrie zijn de gebruikskosten van doorslaggevende betekenis. Daar de kosten van het magnetron een belangrijk deel uitmaken van de totale kosten, moeten de kosten verbonden aan de vervanging van het magnetron zo veel mogelijk beperkt worden. Daarom moeten onderdelen die niet rechtstreeks tot het vacuümsysteem van het magnetron behoren, niet bij zo'n vervanging betrokken zijn. Ook mag geen regelen of bijstellen van de hoogfrequentieapparatuur nodig zijn, opdat de verwisseling kan worden uitgevoerd door ongeschoold personeel.

In dit verband blijkt het voordeel van het gebruik van het keramische materiaal ferroxdure voor de permanente magneet. Dit materiaal heeft een veel grotere coërcitieve veldsterkte dan magnetische legeringen en is daardoor vrijwel ongevoelig voor vreemde magneetvelden en voor veranderingen van de magnetische weerstand van het magnetische circuit [6]). Daardoor kan men magnetronsystemen met ijzeren poolschoenen vervangen zonder dat de inductie in de luchtspleet door de tijdelijke ontmagnetisatie blijvend wordt verzwakt. Bij de magnetrons 7091 en 7292 zijn poolschoenen gebruikt die de luchtspleet minimaal houden. Daardoor is de vereiste hoeveelheid permanentmagnetisch materiaal gering. Het magneetsysteem met keramisch materiaal verenigt aldus de voordelen van de geringe kosten van een zg. „packaged" systeem met het voordeel der demonteerbaarheid van het zg. „unpackaged" systeem.

Behalve deze voordelen heeft het keramische magnetische materiaal ook een zeker nadeel: de gevoeligheid van de magnetische grootheden voor temperatuurvariaties is groter dan die van magnetische legeringen. Dit is echter geen groot bezwaar. In fig. 1 ziet men dat de keramische magneetzuilen door lange smalle ijzeren jukken met het magnetronsysteem verbonden zijn; daardoor is de tijdconstante van de temperatuurstijging van de magneten groter dan een half uur. Bovendien bedraagt de uiteindelijke temperatuurstijging van de magneten slechts 20% van die van het magnetron zelf. Bij de korte werktijden van het magnetron, die voor het verwarmen of bereiden van spijzen nodig zijn, heeft de gevoeligheid van de magneten voor temperatuurveranderingen geen merkbare invloed op de werking van het magnetron. Dit geldt vooral bij een magnetronfornuis, omdat daar variaties van de netspanning en van de belastingsimpedantie het geleverde vermogen relatief ca. 10 maal zo sterk kunnen doen variëren. Om veranderingen in het afgegeven vermogen te kunnen compenseren, moet men de anodespanning kunnen regelen. De (geringe) invloed van temperatuurvariaties kan men overigens elimineren door bij het met lucht gekoelde magnetron, type 7091, twee luchtkanalen extra aan te brengen, die koellucht langs de magneetzuilen blazen. Bij het magnetron met waterkoeling, type 7292, blijft de temperatuurstijging van het magnetron zo gering dat men die van de magneetzuilen mag verwaarlozen.

Werkgegevens en werkdiagrammen

Nu de constructieve details van de continumagnetrons beschreven zijn, gaan we wat nader in op het gedrag van het systeem magnetron-koppelsysteem-oven. Dit gedrag wordt gekarakteriseerd door de wijze waarop de frequentie en het door het magnetron afgegeven vermogen afhangen van de belastingsimpedantie, gevormd door koppelsysteem en oven. Om dit te overzien, zou men een rechthoekig diagram kunnen gebruiken met het reële en het imaginaire deel van de belastingsimpedantie als coördinaten, waarin men krommen van constante frequentie en krommen van constant geleverd vermogen tekent. Het is echter doelmatiger deze krommen te tekenen in een polair diagram waarin de modulus ϱ en het argument φ van de reflexiecoëfficiënt resp. als voerstraal en als azimut zijn uitgezet. Onder de reflexiecoëfficiënt verstaat men hierbij de verhouding der complexe amplitudes van de terugkerende en de heengaande golf, bepaald in een loodrechte doorsnede van de coaxiale leiding die het vermogen van het magnetron afneemt. Men kiest dit „referentievlak" gewoonlijk ter plaatse van de aansluitflens van het magnetron. Om de modulus ϱ te bepalen, meet men de staandegolfverhouding σ in de coaxiale leiding; ϱ hangt met σ samen volgens de formule $\sigma = (1+\varrho)/(1-\varrho)$. Het argument φ hangt op eenvoudige wijze samen met de afstand $\Delta l_{\min}$ van het referentievlak tot het dichtstbij gelegen minimum

[6]) Zie Philips techn. T. **14**, 33-48, 1952 en **16**, 189-195, 1954.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

in de staande golf; er geldt nl. $\Delta l_{min}/\lambda = \frac{1}{4}(1-\varphi/\pi)$, waarin λ de golflengte in de coaxiale leiding is. Om het gebruik van het diagram te vereenvoudigen, zijn in *fig. 4* geen cirkels voor constante waarden van ϱ, maar voor constante waarden van σ getekend. Daar σ loopt van 0 voor $\varrho = 0$ tot $\sigma = \infty$ voor $\varrho = 1$, neemt de waarde van σ snel toe als de cirkel groter wordt. In het diagram zijn evenmin de waarden van φ zelf ingeschreven, maar de waarden van Δl_{min}, uitgedrukt in λ. Bij een constant magneetveld en een constante anodestroom kan men voor willekeurige waarden van de belastingsimpedantie (die zelf niet bekend behoeft te zijn) σ en $\Delta l_{min}/\lambda$ meten. Iedere meting levert een punt in het diagram. Men meet tevens de bijbehorende waarden van de frequentie en van het geleverde vermogen. Doet men dit voor vele waarden van de belastingsimpedantie, en verbindt men punten van gelijk vermogen, en ook punten van gelijke frequentie, dan krijgt men het zg. generatordiagram van het magnetron, ook diagram van Rieke genoemd. *Fig. 4* stelt het generatordiagram voor van de magnetrons 7091 en 7292. Het diagram geldt voor de instelling op 2000 W, d.w.z. voor zodanige waarden van magneetveld en anodestroom dat bij ideale aanpassing (middelpunt diagram, $\sigma = 0$) het geleverde vermogen 2000 W bedraagt. Een beoordeling van de toepassingsmogelijkheid en van de merites van een continumagnetron is nu mogelijk door te letten op de samenhang tussen de verschillende grootheden, die door het diagram in beeld wordt gebracht.

Uit het diagram blijkt dat de kromme voor con-

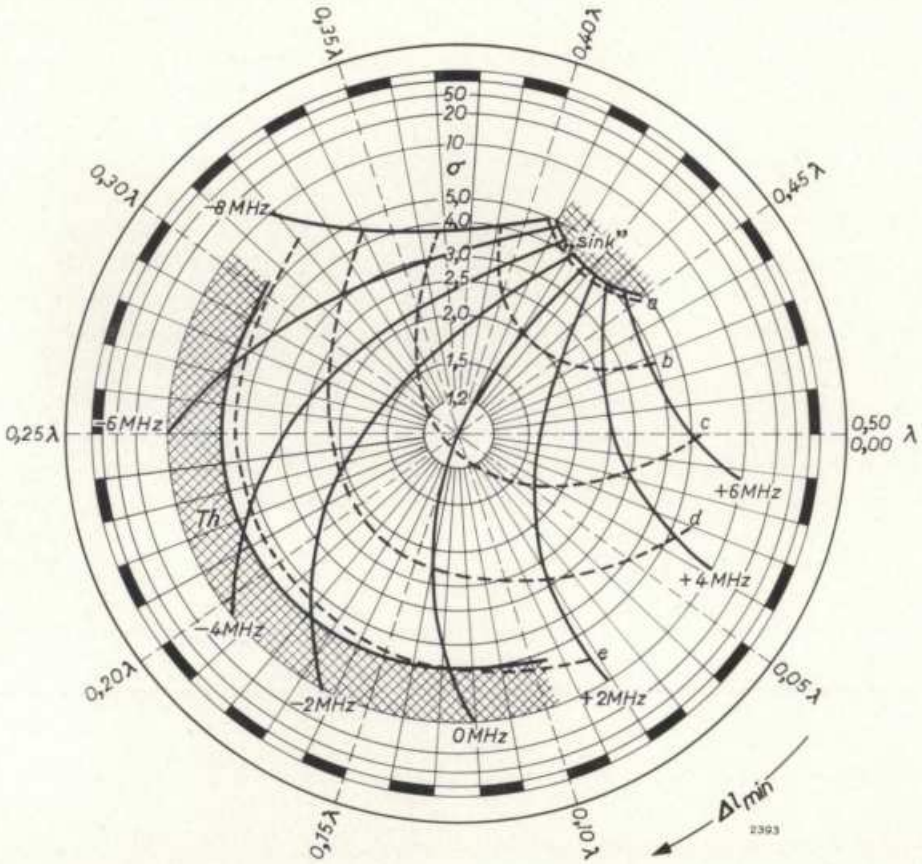


Fig. 4. Generatordiagram of diagram van Rieke van een magnetron, type 7091 of 7292. De cirkels gelden voor de bijgeschreven waarden van de staandegolfverhouding σ. Bij de omtrek staan de waarden van Δl_{min}, d.i. de afstand van het referentievlak (door de aansluitflens van het magnetron) tot het eerste minimum van de staande golf, uitgedrukt in de golflengte λ in de coaxiale uitgangsleiding. Het diagram bevat krommen van constante frequentie (getrokken) en van constant geleverd vermogen (streeplijnen). De letters *a*, *b*, *c*, *d* en *e* bij de streeplijnen verwijzen naar de tabel, waar men de bijbehorende waarden van het geleverde vermogen P_o en van de anodespanning U_a kan aflezen. Het diagram geldt voor de instelling op 2000 W, d.w.z. dat bij afsluiting met een niet-reflecterende belastingsimpedantie — waarmee een staandegolfverhouding $\sigma = 0$ (middelpunt diagram) correspondeert — het geleverde vermogen 2000 W bedraagt. Het gearceerde gebied rechts boven is het gebied van „elektronische instabiliteit" (Engels „sink region"); ertegenover ligt het gebied van thermische instabiliteit *Th*. Als het magnetron werkt, mag σ niet zo groot worden dat het werkpunt in deze gebieden terecht kan komen.

	a	*b*	*c*	*d*	*e*
P_o (W)	2500	2250	2000	1500	1000
U_a (kV)	4,7	4,6	4,5	4,4	4,3

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

stant vermogen bij toenemende waarde van deze parameter naar rechts boven verschuift. Het werkpunt van het magnetron mag echter niet terecht komen in het aldaar door arcering gemerkte gebied (Engels „sink-region"), want dan dreigt instabiliteit: in dit gebied wil het magnetron niet goed meer genereren. Bovendien naderen hier de krommen voor constante frequentie elkaar; de frequentie is hier dan ook zeer instabiel. Tegenover deze „elektronische instabiliteitsgrens" is de zg. „thermische instabiliteitsgrens" *Th* getekend. Wordt deze laatste overschreden, dan treedt door het bombardement van op de katode terugvallende elektronen oververhitting van de katode op. Ook de anode wordt dan oververhit doordat bij de dan optredende sterke reflexie tegen de belastingsimpedantie te weinig vermogen aan het magnetron wordt onttrokken. Men zal ernaar streven het magnetron zo te construeren dat niet alleen deze verboden gebieden zo ver mogelijk uit elkaar liggen, maar dat tevens het middelpunt van het diagram midden tussen de elektronische en de thermische instabiliteitsgrens in ligt. De maximaal toelaatbare staandegolfverhouding, die bepaald wordt door de kleinste afstand tussen het middelpunt en de grenzen der gevaarlijke gebieden, is dan zo groot mogelijk. Bij de continumagnetrons 7091 en 7292 treedt deze situatie op bij de instelling op 2000 watt.

Uit het generatordiagram van fig. 4 kan men ook aflezen tussen welke uiterste waarden de frequentie zich zal instellen als de staandegolfverhouding b.v. 1,6 bedraagt. De cirkel die behoort bij $\sigma = 1{,}6$ raakt de krommen van $+2$ MHz en -2 MHz, en de frequentie zal zich dus instellen binnen het gebied 2400 ± 2 MHz. In Duitsland is het frequentiegebied tussen 2350 en 2450 MHz voor industriële toepassingen aangewezen. In Nederland ligt dit gebied tussen 2400 en 2500 MHz. In verband met de bij hun vervaardiging aangehouden toleranties, vertonen de magnetrons een zekere spreiding in hun frequenties. Men kan daardoor gemakkelijk exemplaren uitzoeken die voor Nederland geschikt zijn.

Het is van veel belang dat het werkpunt niet in het gebied van elektronische instabiliteit terechtkomt, want dit kan het magnetron reeds in korte tijd schade berokkenen. Daarentegen heeft overschrijding van de grens van het thermisch gevaarlijke gebied minder ernstige gevolgen voor de levensduur van het magnetron. De positie der twee gevarenzones hangt natuurlijk af van de anodestroom, en wel verschuiven zij naar binnen als de anodestroom toeneemt, zodat dan de maximaal toelaatbare staandegolfverhouding afneemt.

In het algemeen zal men bij een continumagnetron denken aan gelijkspanning als anodespanning. Het magnetron kan echter ook werken met een wisselanodespanning of met een gelijkgerichte, doch niet-afgevlakte wisselspanning, en dit laatste wordt hier inderdaad toegepast. Bij een tweefazig gelijkgerichte, niet-afgevlakte spanning is de verhouding van de topwaarde van de anodestroom tot de gemiddelde waarde ca. 2,5; het gebied van elektronische instabiliteit ligt dan nog buiten de cirkel voor $\sigma = 4$. Bij wisselstroomvoeding is de toelaatbare waarde van σ kleiner. Bij afgevlakte gelijkspanning — de verhouding van topwaarde en gemiddelde waarde wordt hier ongeveer 1 — ligt de grens van elektronische stabiliteit ver van het midden van het generatordiagram en men zou dus wat dit betreft grote waarden van σ kunnen toelaten. Hiertegen bestaat echter het bezwaar dat bij waarden van σ boven 4 tot 5 (d.w.z. een reflexie van meer dan 50% van het vermogen) gevaar ontstaat voor de contacten en de vacuümdichting in de koppelleiding, doordat op plaatsen van maximale veldsterkte grote energiedichtheden optreden. Daarom kunnen staandegolfverhoudingen groter dan 4 tot 5 toch niet toegelaten worden, zodat het afvlakken geen voordeel oplevert. Men kan dus de kosten van de afvlakcondensatoren sparen, wat gunstig is om het magnetronfornuis voor zoveel mogelijk gebruikers betaalbaar te maken.

Het afvlakken zou overigens nog het gevaar meebrengen dat sproei- en overslagverschijnselen zich als gevolg van condensatorontladingen tot ernstige doorslagen zouden kunnen ontwikkelen. Voor de normale werking van het magnetronfornuis bij 2000 watt is derhalve voeding met twee- of driefazige gelijkrichters zonder afvlakking aan te bevelen.

De *tabellen II* en *III* bevatten enige algemene gegevens van de magnetrons 7091 en 7292, benevens enige gegevens die betrekking hebben op het geval van ideale aanpassing. Ter vergelijking zijn ook voorlopige gegevens van het magnetron 55 125 voor 5 kW opgenomen.

Tabel II. De belangrijkste gegevens van de magnetrons 7091 en 7292, geldig bij ideale aanpassing (voor de instelling op 2000 W), en voorlopige gegevens van het magnetron 55 125.

Type magnetron	7091 en 7292	55 125
Anodespanning	4,5 kV	6,5 kV
Gemiddelde anodestroom	0,75 A	1,4 A
Maximale anodetopstroom	2,1 A	2,4 A
Afgegeven vermogen:		
nominaal	2000 W	5000 W
maximaal	2200 W	9500 W
Maximaal toelaatbare staandegolfverhouding σ_{max}:		2,5
elektronische grens	4,0	
thermische grens	5,0	

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Tabel III. Algemene gegevens van de continumagnetrons 7091 en 7292, benevens voorlopige gegevens van het type 55 125.

Type magnetron	7091	7292	55 125
Systeem voor het afnemen van het vermogen	coaxiale leiding, $1\frac{5}{8}''$; 50Ω		
Koeling, van anodeblok	Koellucht met druk van 15-17 mm waterkolom, ca. 1,7 m³/min.	Koelwater, op zijn minst 0,5 l/min, afhankelijk van de intreetemperatuur.	Koelwater, ca. 2,5 l/min, afhankelijk van de intreetemperatuur.
van katoderadiator	zwakke luchtstroom		
Maximumtemperatuur van anodeblok	125 °C	125 °C	125 °C
Maximumtemperatuur van katoderadiator	180 °C	180 °C	180 °C
Gloeispanning: bij inschakelen	5,0 V (+5%, —10%)		5,5 V (+5%, —10%)
bij normale werking	2,0 V		3,5 V / 1V
Gloeistroom: bij inschakelen	32 A		66 A
bij normale werking	18 A		52 A / 28 A
Opwarmtijd	120 s		240 s

De oven

Wil men met het beschreven magnetron een magnetronfornuis construeren, dan rijst terstond de vraag: welke vorm moet men geven aan de ruimte (de oven) waarin de spijzen aan het microgolfveld zullen worden blootgesteld? Het is gewenst dat in deze ruimte een gelijkmatig verdeelde energiedichtheid heerst, omdat dit een gelijkmatige verwarming van de ingebrachte spijzen bevordert. Kiezen we een rechthoekige vorm, dan werkt deze ruimte als een trilholte die, door middel van een koppelsysteem dat energie toevoert, in trilling gebracht kan worden indien de golflengte in vacuüm λ_0, die beantwoordt aan de magnetronfrequentie f (dus $\lambda_0 = f/c$, waarin c de lichtsnelheid is) en de ribbelengten a_x, a_y en a_z voldoen aan de voorwaarde (m, n en p zijn gehele getallen):

$$\lambda_0 = 2 \Big/ \sqrt{\left(\frac{m}{a_x}\right)^2 + \left(\frac{n}{a_y}\right)^2 + \left(\frac{p}{a_z}\right)^2}. \quad \ldots \quad (3)$$

Deze voorwaarde geldt slechts streng voor een ideale trilholte zonder demping en zonder ruimtelading [7]). Werkelijke trilholten bezitten echter een zekere demping, waardoor hun resonantiekrommen brede maxima hebben, te meer als door de in de trilholte — d.i. dus de oven — gebrachte substanties de demping nog versterkt wordt. Daarom behoeft de voorwaarde (3) niet exact vervuld te zijn; indien slechts de ribbelengten groter zijn dan $\frac{1}{2}\lambda_0$, zullen er altijd gehele getallen m, n en p zijn waarvoor met voldoende nauwkeurigheid aan (3) wordt voldaan. Aan zo'n stel waarden van m, n en p beantwoordt een veldverdeling bestaande uit een patroon van staande golven dat in de drie ribberichtingen resp. m, n en p halve golflengten (niet te verwarren met λ_0) vertoont. Zijn de ribben veel langer dan $\frac{1}{2}\lambda_0$, dan bestaan er vele stellen waarden van m, n en p waarvoor de voorwaarde (3) met voldoende nauwkeurigheid is vervuld. In zo'n oven kunnen dus vele trillingspatronen tegelijk bestaan, en ze worden ook tegelijkertijd aangeslagen voor zover ter plaatse van de koppeling met de aanstotende golfgeleider aan de desbetreffende randvoorwaarden is voldaan. Heeft dus de oven afmetingen die groot zijn ten opzichte van $\frac{1}{2}\lambda_0$, dan leidt de superpositie van de verschillende trillingspatronen tot een min of meer gelijkmatige energieverdeling in de oven. Neemt men geen verdere maatregelen, dan zullen echter toch over grotere afstanden ongelijkmatigheden optreden. Oorzaken hiervoor kunnen zijn: een onsymmetrische koppeling met de energiebron, onregelmatigheden bij de wanden (b.v. de deur), de aanwezigheid van platen om de te verwarmen spijzen op te zetten, enz. Bevinden zich spijzen in de oven, dan hebben ook deze invloed op de veldverdeling. Door de energieabsorptie wordt het resulterende veld dan samengesteld uit golftreinen die, al naar zij de absorberende substantie hebben doorlopen of niet, energie van verschillende dichtheid transporteren. Daarbij komt nog de gedeeltelijke reflexie van de golven aan het oppervlak van de substantie; de grootte van

[7]) De afleiding van (3) vindt men in het in noot [2]) geciteerde artikel.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

deze reflexie hangt af van de diëlektrische constante der substantie. Ook moet men er rekening mee houden dat de aanstootfrequentie nog enigszins variëren kan door de toleranties die bij de fabricage van het magnetron worden aangehouden. Voor het gehele gebied van aanstootfrequenties moet de gewenste gelijkmatigheid van de energieverdeling in de oven gewaarborgd zijn. We zullen thans de maatregelen bespreken die hiervoor in de oven getroffen moeten worden.

De genoemde verbreding van de resonantiepieken als gevolg van de demping van de oven levert tevens een stabilisering van de veldverdeling op, en daarmee van de belastingsimpedantie van het magnetron. Dit laatste is van groot belang, want een van de belangrijkste voorwaarden waaraan voldaan moet worden opdat het magnetron verwisselbaar zal zijn, is dat de lege oven voor alle exemplaren van het gebruikte type magnetron dezelfde belasting vormt en dus ongeveer hetzelfde werkpunt in het generatordiagram oplevert, onafhankelijk van de frequentie van het genomen exemplaar en zonder dat bijstelling nodig is van de zuiger in de aanpasgolfpijp tussen de coaxiale leiding die van het magnetron afkomt en de oven, welke golfpijp als aanpastransformator fungeert. Het blijkt dat een oven van 44 bij 40 bij 36 cm een demping moet hebben die equivalent is met op zijn minst 100 cm³ water. Doordat alle delen van de oven waarin hoogfrequente stromen vloeien, zekere verliezen opleveren, bezit iedere oven reeds een zekere demping, maar deze is slechts voldoende indien de wanden bestaan uit een materiaal met een niet al te geringe weerstand — b.v. V2A-staal — en indien zich in de oven bovendien onderdelen bevinden zoals reflectorplaten en als grilleerinrichting fungerende gloeistaven. Men kan de demping vergroten door de platen waarop de te verwarmen spijzen geplaatst worden, te vervaardigen van diëlektrische materialen zoals glas of bepaalde kunststoffen, die grotere verliezen opleveren dan metalen platen. Zij vormen een basisbelasting, die voldoende is om de apparatuur zonder bezwaar ingeschakeld te laten bij lege oven. Bevindt zich voedsel in de oven, dan gaan slechts enige procenten van het opgenomen vermogen in deze platen verloren, daar hun diëlektrische verliezen veel geringer zijn dan die van het voedsel.

Fig. 5 geeft twee doorsneden van de oven van een magnetronfornuis. In de oven ziet men een plaat om de spijzen op te zetten, een enige malen gebogen gloeistaaf als grilleerinrichting en een reflectorplaat. Deze laatste dient om in de oven een homogene energiedichtheid te bevorderen. De reflector gaat voornamelijk de ongelijkmatigheid tegen die veroorzaakt wordt door de onsymmetrische aansluiting van de aanpasgolfpijp (zie hieronder). Hetzelfde resultaat kan men verkrijgen door de ribben met platen af te schuinen.

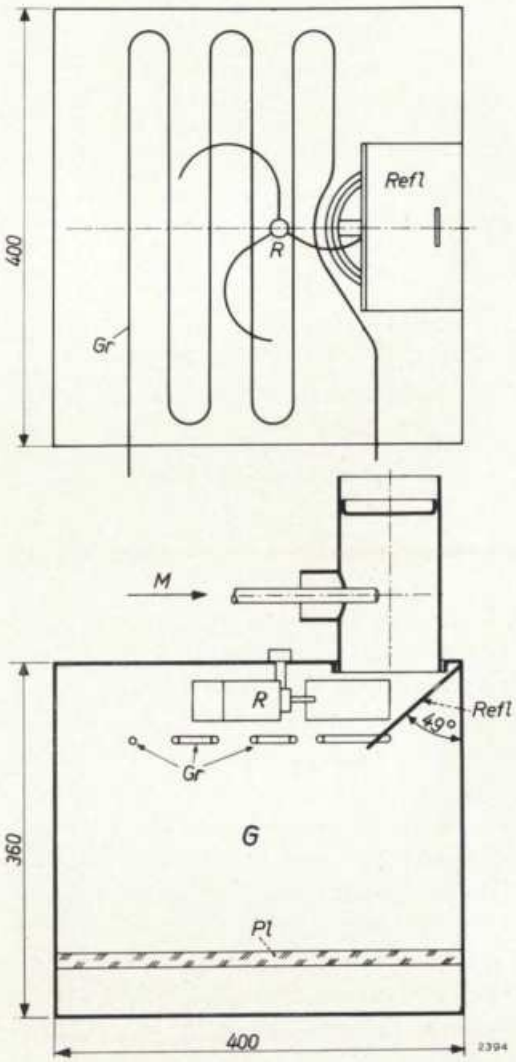


Fig. 5. Twee doorsneden door de oven van een experimenteel magnetronfornuis. *M* aansluiting magnetron. *G* oven. *Refl* reflector. *R* veldroerder. *Gr* grilleergloeistaven. *Pl* plaat waarop de spijzen worden geplaatst. Afmetingen in mm.

De uitwerking van al deze maatregelen en de gunstigste plaatsing van de reflectorplaten kan alleen experimenteel worden vastgesteld. Voor dit doel werden 25 schaaltjes, die elk 50 cm³ water bevatten, in de oven van een proeffornuis geplaatst. De temperatuurstijging van het water in deze schaaltjes in een zekere tijd geeft dan kwalitatief en kwantitatief uitsluitsel omtrent de over de tijd gemiddelde verdeling van de energiedichtheid in het vlak waarin de schaaltjes zijn opgesteld. *Fig. 6a* toont het resultaat van een eerste proef. Het sterke oplopen aan de rechterkant van de oven komt doordat de aanpasgolfpijp niet symmetrisch is aangeslo-

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

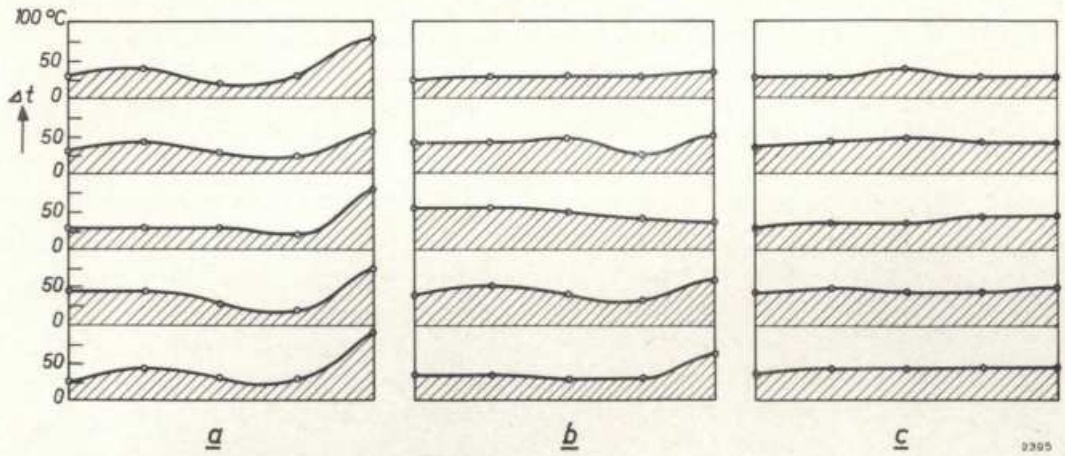


Fig. 6. De verdeling van de energiedichtheid in de oven van een experimenteel magnetronfornuis. De drie rechthoeken *a*, *b* en *c* hebben betrekking op dezelfde horizontale doorsnede door de oven ter hoogte van de plaats der spijzen. Langs vijf rechte lijnen in deze doorsnede is in vijf punten van iedere lijn de temperatuurverhoging uitgezet van in deze punten opgestelde bakjes met 50 cm³ water. Het fornuis werd steeds gedurende dezelfde tijd ingeschakeld.
a) Oorspronkelijke verdeling van de energiedichtheid.
b) Door aanbrengen van een reflectorplaat met spleet (zie fig. 5) is de verdeling gelijkmatiger gemaakt.
c) Door het gebruik van een „veldroerder" is de verdeling van de energiedichtheid, gemiddeld over de tijd, in hoge mate gehomogeniseerd.

ten. Overwegingen van praktische aard hebben tot deze asymmetrie geleid: behalve deze golfpijp moesten namelijk ook het magnetron en een ventilator op de oven een plaats vinden. Uit fig. 6*b* blijkt dat de in fig. 5 getekende, van een spleet voorziene reflector reeds een zekere verbetering brengt. Een verdere verbetering van de gelijkmatigheid der energiedichtheid — althans van het tijdgemiddelde ervan — kan men verkrijgen door de verdeling van de energiedichtheid voortdurend te laten variëren. Dit kan b.v. gebeuren door grootheden te variëren die invloed hebben op de randvoorwaarden voor de veldverdeling. Daar de frequentie van het magnetron slechts binnen nauwe grenzen kan variëren, leveren veranderingen in de geometrie van de oven de enige mogelijkheid. Men moet daartoe de wanden zelf, of speciale reflectorplaten, periodieke bewegingen laten uitvoeren. De in fig. 5 afgebeelde oven bevat een roterende vleugelreflector, die men „veldroerder" noemt. Door een (experimenteel bepaalde) gunstige vorm en plaats van de veldroerder werd de dichtheidsverdeling van de gedissipeerde energie verkregen die in fig. 6*c* is weergegeven. Natuurlijk zou men een zekere homogeniteit van de warmteontwikkeling in de spijzen ook kunnen bewerkstelligen door deze spijzen op een blad te plaatsen dat in de oven ronddraait.

Heeft men door de beschreven maatregelen een gelijkmatige verdeling van de energiedichtheid tot stand gebracht, dan wordt deze weer verstoord doordat de ingebrachte spijzen absorberen en reflecteren. Zo is het vrijwel onmogelijk ervoor te zorgen dat voor elke willekeurige oveninhoud de energiedichtheid homogeen is. In de praktijk blijkt echter dat men ook zonder exacte homogeniteit van de energiedichtheid een verwarming bereiken kan die voldoende gelijkmatig is, aangezien de warmtegeleiding in de spijzen voor een zekere vereffening zorgt.

De oven moet door een deur gemakkelijk toegankelijk zijn. Doordat de deur in gesloten toestand de microgolfenergie moet opsluiten, leveren de deurcontacten nog enige problemen. Bij de gebruikelijke deurconstructies is het optreden van reten onvermijdelijk. Smalle reten in de ovenwand laten reeds microgolfenergie door en storen bovendien de veldverdeling binnen. Men zal in de eerste plaats proberen langs mechanische weg een goed elektrisch contact in de deurvoegen tot stand te brengen, b.v. door middel van een reeks contactveren rondom de deuropening. Bij hoge frequenties is het nodig voor zeer betrouwbare contacten te zorgen, maar het is moeilijk deze op de lange duur goed te laten functioneren, daar vervuiling onvermijdelijk is. De tweede mogelijkheid om de deur „hoogfrequentiedicht" te maken, bestaat in de toepassing van zg. $\lambda/4$-gleuven. Daarbij maakt men gebruik van twee tegenover elkaar gelegen gleuven, beide ter diepte van $\lambda/4$ (= 31 mm in dit geval, waarbij f = 2400 Hz en λ = 12,5 cm), die samen een golfpijp ter lengte $\lambda/2$ vormen, die aan het eind is kortgesloten (*fig. 7a*). Ten gevolge van reflexie vormt zich in deze gleuven een staande golf, waarvan spannings- en stroomverdeling in fig. 7*b* geschetst zijn. Daar de stroom in het midden nul is, mag het contact daar gebrekkig zijn en men kan daar dus de voeg tussen ovenwand en deur leggen.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Op deze manier wordt — althans theoretisch — het effect bereikt van een voegloos gesloten ruimte en men kan rekenen op een aanzienlijke ongevoeligheid voor corrosie en vervuiling.

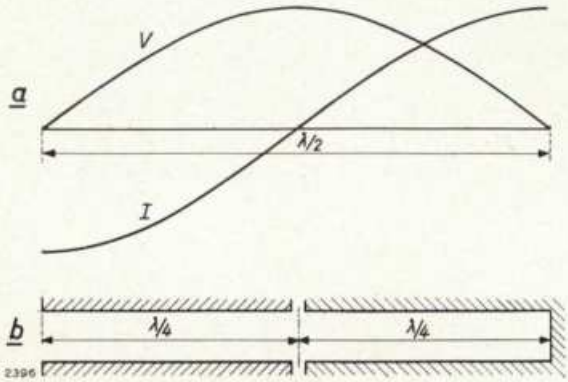


Fig. 7. De afdichtende werking van $\lambda/4$-gleuven.
a) Twee gleuven ter diepte $\lambda/4$, die tegenover elkaar zijn opgesteld, vormen een golfpijp ter lengte $\lambda/2$ die aan het einde is kortgesloten.
b) De verdeling van de amplitudes U en I van resp. spanning en stroom langs de golfpijp ter lengte $\lambda/2$. Op de plaats waar $I = 0$ is, heeft een slecht elektrisch contact weinig invloed.

In de praktijk blijken de gleuven ter diepte $\lambda/4$ op zichzelf niet afdoende te zijn, vooral niet bij de grote wandstromen die optreden als de oven leeg is. Daarom verdient het aanbeveling de $\lambda/4$-gleuven te combineren met een goed mechanisch contact. Men komt zo tot de constructie van *fig. 8*, waarbij echter het bestaande mechanische contact rechts tussen deur en huis door ingesneden veren moest worden verbeterd. In de figuur zijn deze veren niet getekend.

Bij lege oven lopen de grootste wandstromen. Dan worden de deurcontacten het zwaarst belast en is het gevaar dat de contacten worden aangetast en dat microgolfenergie ontsnapt het grootst. Men moet hierbij tevens bedenken dat de microgolfenergie niet

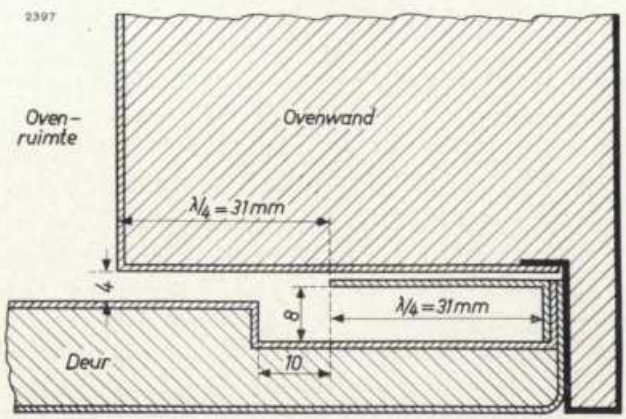


Fig. 8. Toepassing van $\lambda/4$-gleuven om uitstraling van microgolven bij de deurvoegen van de oven te voorkomen. In de praktijk blijkt het nochtans gunstig ook nog contactveren aan te brengen. Deze contactveren zijn niet getekend.

altijd gelijkmatig over de gehele deuromtrek is verdeeld, maar dat zij, bij ondoelmatige constructie, dikwijls geconcentreerd uit de hoeken of scharnieren wordt uitgestraald.

Constructie en schakeling van een magnetronfornuis

Wij zullen ten slotte aan de hand van een laboratoriumuitvoering de praktische uitvoering van een magnetronfornuis bespreken en daarbij tevens ingaan op de voedingsschakeling. Een magnetronfornuis dat voor ruime verbreiding en voor bediening door ongeschoolde gebruikers (koks en huisvrouwen) bestemd is, moet betrouwbaar zijn en gemakkelijk en overzichtelijk te bedienen. Men moet het dus voorzien van beveiligingsinrichtingen tegen overbelasting en tegen beschadiging of ongelukken bij verkeerde bediening.

Fig. 9 is een ietwat vereenvoudigde voorstelling van een magnetronfornuis dat in de keuken van een restaurant of van een huishouden toepassing zou kunnen vinden. Men kijkt vanaf de achterzijde in het opengesneden apparaat. Zoals men ziet, bevindt de oven zich halverwege de hoogte, dus op dezelfde plaats waar men ook bij een gewoon fornuis de oven aantreft. Bovenop de oven is het magnetron M opgesteld met zijn coaxiale uitgangsleiding en de koppelaanpasgolfpijp *Ek* voor de verbinding met de oven. Hier hebben tevens de koelventilator K en de motor van de veldroerder R een plaats gevonden. In de achterwand van de rechthoekige ovenruimte is een afzuigventilator L aangebracht. De ovendeur is van gaten voorzien, waardoor verse lucht kan toestromen. (Door deze gaten en langs de afzuigventilator kan de microgolfenergie niet noemenswaardig ontsnappen.) De gaten in de ovendeur maken het mogelijk de spijzen gedurende de bereiding voortdurend gade te slaan. Voor dit doel moet de oven inwendig voorzien zijn van een verlichting, die in fig. 9 echter niet getekend is. In de oven kan tevens een enige malen gebogen gloeistaaf als grilleerinrichting worden aangebracht, die — zoals we reeds vermeldden — een rol speelt als basisbelasting van het magnetron, maar die tevens de mogelijkheid biedt de diëlektrische verwarming met de traditionele te combineren en b.v. vlees het bruine korstje te geven waaraan we gewend zijn. Uiterlijk ziet men de spijzen gedurende de verhitting in het magnetronfornuis slechts weinig veranderen, en het is daarom gewenst de tijd dat het fornuis is ingeschakeld, met een ingebouwde schakelklok te begrenzen. Deze klok is, samen met enige schakelaars en controlelampjes, aangebracht op een schakelbord boven de ovendeur.

De voedingsapparatuur bevindt zich onder de oven. Op fig. 9 ziet men waar de verschillende onder-

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

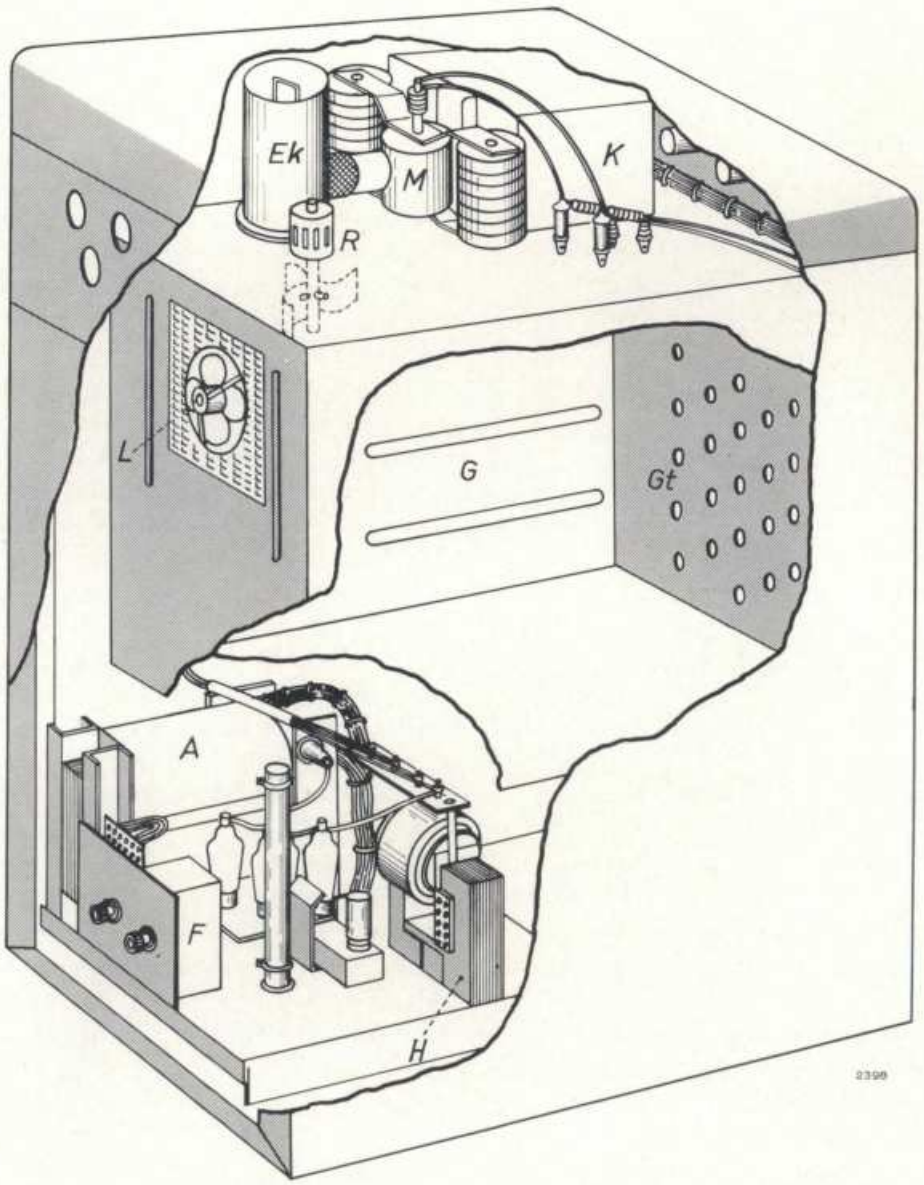


Fig. 9. Voorbeeld van de constructie van een magnetronfornuis. *M* magnetron. *K* koelventilator. *Ek* aanpasgolfpijp. *R* veldroerder. *G* oven. *L* afzuigventilator. *Gt* ovendeur. *A* transformator voor de anodespanning. *F* ontstoringsfilter. *H* gloeistroomtransformator (waarvan de secundaire zijde zich op hoogspanning bevindt).

delen, zoals buizen en transformatoren, zijn geplaatst. Het blokschema van *fig. 10* geeft nadere bijzonderheden over de voedingsschakeling. Bij de netaansluiting bevindt zich een ontstoringsfilter, dat verhindert dat golven die bij het inschakelen van het magnetron worden opgewekt, in het net terechtkomen. Bij het inzetten van de hoofdschakelaar S_1 worden de koelventilator K van het magnetron, de veldroerder R, de afzuigventilator L, en de gloeidraden van het magnetron en van de gelijkrichtbuizen in werking gesteld. Het blok H voor de gloeistroom van het magnetron bevat een gloeistroomtransformator, waarvan de secundaire zijde zich op hoogspanning bevindt en die dienovereenkomstig geïsoleerd is. Daarom wordt de gloeistroom aan de primaire zijde geregeld. Twee minuten nadat S_1 is ingezet, sluit het tijdrelais T de beveiligingsschakelaar V, zodat men nu met S_2 de anodespanning van het magnetron kan inschakelen. De tijd dat het fornuis moet werken, stelt men van te voren in met de schakelklok t. In serie met schakelaar S_2 bevinden zich nog de beveiligingsschakelaars Tk en Lk. De deurschakelaar Tk verhindert dat het magnetron werkt als de deur geopend is; bracht men namelijk de hand in het stralingsveld, dan zouden inwendige weefselbeschadigingen het gevolg kunnen zijn. Schakelaar Lk is slechts gesloten als de temperatuur van het magnetron niet te hoog is en de koeling met lucht of water dus behoorlijk functioneert.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

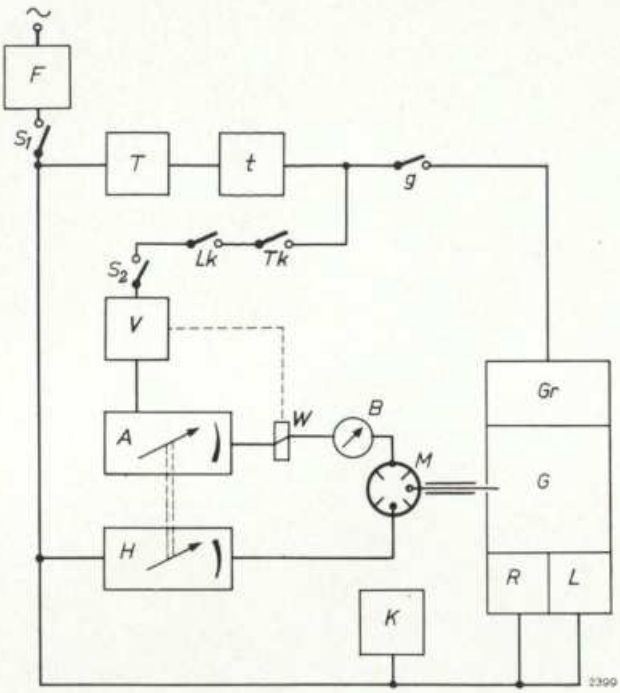


Fig. 10. Blokschema van een magnetronfornuis. *F* ontstoringsfilter. S_1 hoofdschakelaar. *T* tijdrelais. *t* schakelklok. S_2 schakelaar voor de anodespanning van het magnetron. *Lk* en *Tk* beveiligingsschakelaars, die slechts ingeschakeld zijn als resp. de magnetrontemperatuur niet te hoog is en de ovendeur gesloten is. *V* schakelaar voor de anodespanning. *A* voedingsapparaat voor de anodespanning. *H* gloeistroomtransformator. *W* overstroomveiligheid. *M* magnetron. *B* meetinstrument voor de anodestroom. *K* koelventilator voor het magnetron. *G* oven. *R* veldroerder. *L* afzuigventilator. *Gr* grilleerinrichting. *g* schakelaar voor *Gr*.

Blok *A* voor de anodespanning bevat de anodespanningstransformator met regeling aan de primaire zijde, en de gelijkrichtbuizen. Bij de bespreking van het generatordiagram (fig. 4) is reeds vermeld dat het magnetron met een niet-afgevlakte pulserende gelijkstroom kan worden gevoed. De verhouding van topwaarde en gemiddelde waarde van de anodestroom heeft invloed op de toelaatbare waarde van de staandegolfverhouding σ, waarmee bij het ontwerp van het hoogspannings- en het gelijkrichtgedeelte rekening is gehouden. Het is gewenst dat, na het inschakelen, de anodespanning van de kleinste waarde af geleidelijk wordt opgevoerd; dan kan het niet gebeuren dat de smaak van gevoelige spijzen nadeel ondervindt door plotselinge oververhitting. Symbolisch is in fig. 10 aangegeven dat de gloeispanning na inschakelen van de anodestroom geleidelijk verkleind wordt, anders zou door de verhitting van de katode door terugvallende elektronen de katodetemperatuur te hoog oplopen. Het in fig. 10 getekende meetinstrument *B* wijst de anodestroom aan. Het dient ter controle van het door het magnetron geleverde vermogen en vergemakkelijkt zodoende de bediening van het magnetronfornuis. Het is daarbij voor de praktijk niet nodig dat de schaal van het instrument van getallen is voorzien, het is voldoende als is aangegeven tot hoe ver de meter mag uitslaan. Wordt de anodestroom te groot, wat b.v. door schommelingen van de netspanning kan worden veroorzaakt, dan schakelt het relais *W* via de schakelaar *V* de anodespanning uit.

In de oven *G* is nog de grilleerinrichting *Gr* te zien, die met een afzonderlijke schakelaar *g* in werking kan worden gesteld, maar die ook door de schakelklok bediend kan worden.

De in fig. 9 geschetste uitvoering van een magnetronfornuis is slechts een voorbeeld. Men kan b.v. ook een doorloopoven maken, die dient om grote aantallen gelijke schotels te verwarmen of gaar te maken en die in grote keukens en kantines toepassing kan vinden. Hier zou men met voordeel het reeds genoemde continumagnetron voor 5 kW (fig. 2) kunnen gebruiken. Zo'n doorloopoven leent zich goed voor automatisering. In deze vorm kan de verwarming met microgolfenergie ook in de industrie toepassing vinden, b.v. voor het drogen van hout, papier en textielprodukten, het lassen en sinteren van kunststoffen en nog talloze andere toepassingen [8]). Vergeleken met de traditionele wijze van (capacitieve) hoogfrequentieverhitting heeft men het voordeel dat men een groter vermogen in het werkstuk concentreren kan. Vergeleken met verwarming met infraroodstralers is er het voordeel van de grotere indringingsdiepte van de golven en daardoor de verwarming van binnen uit.

[8]) Zie b.v. W. Schmidt, Mikrowellengenerator zur dielektrischen Erwärmung und Trocknung nichtmetallischer Bahnen und Folien, Elektron. Rdsch. **13**, 359, 1959.

Samenvatting. Na een overzicht van de fysische grondslagen van de diëlektrische verwarming in een microgolfstralingsveld wordt een magnetron beschreven dat continu 2 kW kan leveren bij 2400 MHz. Het magnetron wordt in twee uitvoeringsvormen (koeling met water of lucht) vervaardigd, en is bijzonder geschikt voor verwarming van spijzen in een trilholte (magnetronfornuis). Het magnetron heeft een geïmpregneerde naleveringskatode, geeft het vermogen via een dubbele koppellus af aan een coaxiale uitgangsleiding en is met een keramische magneet (ferroxdure) uitgerust. De eigenschappen van het magnetron worden besproken aan de hand van het generatordiagram (diagram van Rieke).

Bij het gebruik in een magnetronfornuis moet het magnetron werken bij een sterk variërende belastingsimpedantie. De oven van het fornuis moet zodanig ontworpen worden dat belastingsreflexie, met als gevolg staande golven in de uitgangsleiding van het magnetron, slechts in beperkte mate kan optreden. Door middel van reflectorplaten in de oven en een „veldroerder" kan men in de oven een homogene veldverdeling teweegbrengen. Het is van belang ervoor te zorgen dat de oven een voldoende demping oplevert, ook als hij geen spijzen bevat. Verder moet men er zorg aan besteden dat de deurvoegen geen hoogfrequente straling doorlaten. Dit kan men doen door gebruik te maken van zg. $\lambda/4$-gleuven. Ten slotte worden constructie en schakeling van een laboratoriumuitvoering van een magnetronfornuis besproken. Een later ontwikkeld magnetron voor 5 kW wordt genoemd.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!